

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Petra Komazec

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.

Student:

Petra Komazec

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Prvenstveno se zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Nastiji Degiuli na svim korisnim savjetima, pomoći te ukazanom povjerenju tijekom izrade diplomskog rada.

Veliku zahvalu dugujem i asistentici Ivani Martić na odvojenom vremenu, uloženom trudu i velikoj pomoći pri izradi ovog rada.

Posebno zahvaljujem svojim roditeljima na strpljenju, razumijevanju i svim odricanjima kako bi mi omogućili da ostvarim svoj cilj. Želim zahvaliti i svome bratu koji mi je uvijek bio spreman pomoći. Također veliko hvala mojem dečku koji je cijelim putem bio uz mene i pružao mi neizmjernu podršku.

Petra Komazec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Petra Komazec** Mat. br.: 0035183318

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ Približno određeniH značajki mase broda na dodatni otpor na valovima**
Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF THE APPROXIMATED MASS CHARACTERISTICS OF A SHIP ON THE ADDED RESISTANCE IN WAVES**

Opis zadatka:

Dodatni otpor broda na valovima jedan je od glavnih uzročnika nenamjernog smanjenja brzine plovidbe i povećanja potrošnje goriva te ga prilikom projektiranja forme broda nije dovoljno uzeti u obzir samo kao postotak sile ukupnog otpora broda na mirnoj vodi. Dodatni otpor broda na valovima sila je drugog reda koja ovisi o gibanjima broda, a nastaje uslijed interakcije valnog sustava broda i nailaznih valova. Od velike je važnosti procijeniti dodatni otpor broda na valovima već u preliminarnoj fazi osnivanja broda. Obzirom da u preliminarnoj fazi osnivanja značajke mase broda najčešće nisu poznate, potrebno je s dovoljnom točnošću procijeniti položaj težišta mase te radijuse tromosti mase broda kako bi rezultati proračuna dodatnog otpora broda na valovima bili što pouzdaniji.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Dati pregled metoda kojima je moguće približno odrediti položaj težišta mase broda po visini te radijuse tromosti mase.
2. Proračunati dodatni otpor broda na pravilnim valovima u pramac za dva kontejnerska broda i jedan tanker te dobivene rezultate usporediti s eksperimentalnim podacima iz literature.
3. Proračunati dodatni otpor broda na pravilnim valovima za različite kutove nailaska valova koso u pramac te za bočne valove.
4. Analizirati utjecaj približno određenog položaja težišta mase broda te radijusa tromosti mase na dodatni otpor broda na valovima.
5. Proračunati dodatni otpor broda na valovima za brod u balastnom stanju te dobivene rezultate usporediti s rezultatima za brod u stanju punog opterećenja.

U radu koristiti programski paket HydroSTAR (Bureau Veritas) dostupan na FSB-u.


Zadatak zadan:
11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:
13. srpnja 2017.

Predviđeni datumi obrane:
19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
1.1. Dodatni otpor broda na valovima.....	2
1.1.1. Dodatni otpor uzrokovan gibanjima broda	3
1.1.2. Dodatni otpor uzrokovan difrakcijom valova	4
1.2. Vremenski osrednjena vrijednost dodatnog otpora broda na harmonijskim valovima	4
1.3. Dodatni otpor kao problem drugog reda	4
1.4. Teorija potencijalnog strujanja.....	6
1.5. Metode određivanja dodatnog otpora broda na valovima.....	9
1.5.1. Maruova metoda	10
1.5.2. Havelockova metoda.....	11
1.5.3. Joosenova metoda	12
1.5.4. Salvensenova metoda.....	12
1.5.5. Boeseova metoda	13
1.5.6. Gerritsmaova i Beukelmanova metoda	13
1.6. Hidrodinamički model	14
1.6.1. LTI sustav	14
1.6.2. Načelo superpozicije	15
1.6.3. Gibanje broda na nepravilnim valovima.....	15
1.7. Panelna metoda	16
1.7.1. Panelna metoda na temelju Greenovog integralnog teorema.....	16
1.7.2. Metoda uzdignutih panela.....	18
1.7.3. Primjena i ograničenja	19
1.7.3.1. Frekvencijska domena	19
1.7.3.2. Vremenska domena.....	19
1.8. Dodatni otpor broda u balastnom stanju	20
2. METODE ZA PRIBLIŽNO ODREĐIVANJE POLOŽAJA TEŽIŠTA MASE BRODA I RADIJUSA TROMOSTI MASE	21
2.1. Približno određivanje položaja težišta mase broda	21
2.1.1. Metoda 1	24
2.1.2. Metoda 2	25
2.1.2.1. Metoda 2 – I način	25
2.1.2.2. Metoda 2 – II način.....	25
2.1.3. Metoda 3	25
2.1.4. Metoda 4	26
2.1.5. Metoda 5	26
2.1.6. Metoda 6	26

2.1.7. Metoda 7	27
2.2. Rezultati metoda za približno određivanje položaja težišta mase broda	29
2.3. Približno određivanje radijusa tromosti mase broda	32
2.3.1. Metoda 1	32
2.3.2. Metoda 2	32
2.3.3. Metoda 3	33
2.3.4. Metoda 4	33
2.3.5. Metoda 5	33
2.4. Rezultati metoda za približno određivanje radijusa tromosti mase broda	34
3. PRINCIP RADA PROGRAMSKOG PAKETA HYDROSTAR	36
3.1. Sile zanošenja i kvadratna prijenosna funkcija QTF	36
3.2. Prijenosna funkcija	40
3.3. Susretna frekvencija	40
3.4. Iregularne frekvencije	42
4. PRIPREMA PODATAKA ZA HYDROSTAR	43
4.1. Definiranje ulaznih podataka za stanje punog opterećenja	43
4.1.1. Raspon valnih frekvencija	47
4.2. Definiranje ulaznih podataka za balastno stanje	51
4.3. Variranje položaja težišta mase broda i radijusa tromosti mase	52
5. REZULTATI PRORAČUNA DODATNOG OTPORA BRODA NA PRAVILNIM VALOVIMA	53
5.1. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata dodatnog otpora na pravilnim valovima u pramac	53
5.2. Usporedba rezultata dodatnog otpora na pravilnim valovima za različite kutove nailaska valova	57
5.3. Analiza utjecaja položaja težišta mase broda na dodatni otpor broda na valovima u pramac	60
5.3.1. Analiza utjecaja položaja težišta mase broda na dodatni otpor broda za različite kutove nailaska valova	63
5.4. Analiza utjecaja radijusa tromosti mase broda oko osi x na dodatni otpor broda na valovima u pramac	67
5.4.1. Analiza utjecaja radijusa tromosti mase broda oko osi x na dodatni otpor broda na valovima za različite kutove nailaska valova	69
5.5. Analiza utjecaja radijusa tromosti mase broda oko osi y i z na dodatni otpor broda na valovima u pramac	73
5.5.1. Analiza utjecaja radijusa tromosti mase broda oko osi y i z na dodatni otpor broda na valovima za različite kutove nailaska valova	76
5.6. Analiza utjecaja dodatnog otpora broda na valovima za balastno stanje i usporedba sa stanjem punog opterećenja	80
6. ZAKLJUČAK	82
LITERATURA	84

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz vremenski osrednjene vrijednosti dodatnog otpora broda na valovima [2] .	4
Slika 2.	Stupnjevi slobode gibanja broda [5].....	8
Slika 3.	Princip rada LTI sustava [7]	14
Slika 4.	Prikaz težišta mase broda po visini [14].....	21
Slika 5.	Susretni kutovi broda i valova [29]	41
Slika 6.	Panelni model kontejnerskog broda KCS za stanje punog opterećenja	44
Slika 7.	Panelni model kontejnerskog broda S175 za stanje punog opterećenja.....	45
Slika 8.	Panelni model tankera KVLCC2 za stanje punog opterećenja	46
Slika 9.	Panelni model kontejnerskog broda KCS za balastno stanje	51
Slika 10.	Panelni model tankera KVLCC2 za balastno stanje	52
Slika 11.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KCS pri $Fr = 0,26$	53
Slika 12.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KCS pri $Fr = 0,33$	54
Slika 13.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KCS pri $Fr = 0,4$	54
Slika 14.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za S175 pri $Fr = 0,15$	55
Slika 15.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za S175 pri $Fr = 0,2$	55
Slika 16.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za S175 pri $Fr = 0,25$	56
Slika 17.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$..	56
Slika 18.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KVLCC2 pri $Fr = 0,18$..	57
Slika 19.	Usporedba rezultata dodatnog otpora za različite kutove nailaska valova za KCS pri $Fr = 0,26$	58
Slika 20.	Usporedba rezultata dodatnog otpora za različite kutove nailaska valova za S175 pri $Fr = 0,25$	58
Slika 21.	Usporedba rezultata dodatnog otpora za različite kutove nailaska valova za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	59
Slika 22.	Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,26$	61
Slika 23.	Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,40$	61
Slika 24.	Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,20$	61
Slika 25.	Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,25$	62
Slika 26.	Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	62
Slika 27.	Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,18$	62
Slika 28.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	63
Slika 29.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	63
Slika 30.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	64
Slika 31.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	64
Slika 32.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	64
Slika 33.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	65

Slika 34.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	65
Slika 35.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	65
Slika 36.	Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	66
Slika 37.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,26$	67
Slika 38.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,4$	67
Slika 39.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,20$	68
Slika 40.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,25$	68
Slika 41.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	68
Slika 42.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,18$	69
Slika 43.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	70
Slika 44.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	70
Slika 45.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	70
Slika 46.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	71
Slika 47.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	71
Slika 48.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	71
Slika 49.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	72
Slika 50.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	72
Slika 51.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	72
Slika 52.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,26$	73
Slika 53.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,40$	73
Slika 54.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,20$	74
Slika 55.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,25$	74
Slika 56.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	75
Slika 57.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,18$	76
Slika 58.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	77

Slika 59.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	77
Slika 60.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$	77
Slika 61.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	78
Slika 62.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	78
Slika 63.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$	78
Slika 64.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	79
Slika 65.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	79
Slika 66.	Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$	79
Slika 67.	Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KVLCC2 u balastnom stanju pri $Fr = 0,142$	80
Slika 68.	Usporedba rezultata za KVLCC2 u balastnom stanju i stanju punog opterećenja pri $Fr = 0,142$	80
Slika 69.	Usporedba rezultata za KCS u balastnom stanju i stanju punog opterećenja pri $Fr = 0,26$	81

POPIS TABLICA

Tablica 1. Stvarne vrijednosti položaja težišta mase broda za tri različita broda	29
Tablica 2. Period ljuljanja za brodove KCS, KVLCC2 i S175	29
Tablica 3. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 1	30
Tablica 4. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 2 – I način	30
Tablica 5. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 2 – II način	30
Tablica 6. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 3	30
Tablica 7. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 4	30
Tablica 8. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 5	30
Tablica 9. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 6	31
Tablica 10. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 7	31
Tablica 11. Stvarne vrijednosti radijusa tromosti mase za tri različita broda	34
Tablica 12. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 1	34
Tablica 13. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 2	34
Tablica 14. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 3	34
Tablica 15. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 4	35
Tablica 16. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 5	35
Tablica 17. Osnovne značajke kontejnerskog broda KCS	43
Tablica 18. Osnovne značajke kontejnerskog broda S175	45
Tablica 19. Osnovne značajke tankera KVLCC2	46
Tablica 20. Froudeovi brojevi i odgovarajuće brzine kontejnerskog broda KCS	47
Tablica 21. Froudeovi brojevi i odgovarajuće brzine kontejnerskog broda S175	47
Tablica 22. Froudeovi brojevi i odgovarajuće brzine tankera KVLCC2	47
Tablica 23. Frekvencije nailaznih valova za brod KCS pri $Fn = 0,26$	48
Tablica 24. Frekvencije nailaznih valova za brod KCS pri $Fn = 0,33$	48
Tablica 25. Frekvencije nailaznih valova za brod KCS pri $Fn = 0,40$	48
Tablica 26. Frekvencije nailaznih valova za brod S175 pri $Fn = 0,15$	49
Tablica 27. Frekvencije nailaznih valova za brod S175 pri $Fn = 0,20$	49
Tablica 28. Frekvencije nailaznih valova za brod S175 pri $Fn = 0,25$	49
Tablica 29. Frekvencije nailaznih valova za brod KVLCC2 pri $Fn = 0,142$	50
Tablica 30. Frekvencije nailaznih valova za brod KVLCC2 pri $Fn = 0,18$	50
Tablica 31. Osnovne značajke kontejnerskog broda KCS u balastnom stanju	51
Tablica 32. Osnovne značajke tankera KVLCC2 u balastnom stanju	51

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_{SW}	N	otpor na mirnoj vodi
R_W	N	otpor uslijed vjetra
R_{AW}	N	dodatni otpor na valovima
R_T	N	ukupni otpor broda
L_{pp}	m	duljina između okomica
λ	m	valna duljina
ρ	kg/m ³	gustoća fluida
g	m/s ²	ubrzanje zemljine sile teže
P	N/m ²	dinamički tlak
n_1	-	uzdužna komponenta vektora normale
$P^{(1),(2)}$	N/m ²	dinamički tlak fluida prvog i drugog reda
$\Delta P^{(1)}$	N/m ²	promjena $P^{(1)}$ na površini trupa uslijed gibanja broda
Δn_1	N/m ²	promjena x komponente normale na oplatu broda S uslijed poniranja i posrtanja
ξ	m	elevacija vala
ζ_a	m	jedinična valna amplituda
S	m ²	oplakana površina broda
\vec{v}	m/s	vektor brzine strujanja fluida
F_{ij}'	N	sila zanošenja
m	kg	masa broda
\vec{p}	kg m/s	impuls sile
k	1/m	valni broj
F_{3a}	N	amplituda uzbudne sile poniranja
η_{3a}	m	amplituda poniranja
ε_{3F_3}	rad	fazni pomak između amplitude poniranja i uzbudne sile poniranja
F_{5a}	N	amplituda uzbudne sile posrtanja
η_{5a}	m	amplituda posrtanja
ε_{5F_5}	rad	fazni pomak između amplitude posrtanja i uzbudne sile posrtanja
ω	rad/s	frekvencija valova
b_{33}	-	bezdimenzijski koeficijent prigušenja poniranja
b_{55}	-	bezdimenzijski koeficijent prigušenja posrtanja
β	°	kut nailaska valova
R_γ	N	difrakcijska komponenta sile
r_{3a}	-	relativna amplituda poniranja
x_b	m	položaj težišta volumena vrpce

y_w	m	poluširina vodne linije vrpce
∇	m ³	volumen istisnine broda
ω_e	rad/s	susretna frekvencija
U	m/s	brzina napredovanja broda
a_{33}	-	bezdimenzijski koeficijent dodatne mase
v_{3a}^*	m	vertikalna relativna brzina vrpce
v	m/s	brzina broda
v_x, v_y, v_z	m/s	komponente vektora brzine strujanja u smjeru koordinatnih osi
Φ_w	m ² s	potencijal brzine vala
d	m	dubina
\overline{KG}	m	položaj težišta mase broda po visini
\overline{KB}	m	udaljenost težišta volumena istisnine od kobilice
\overline{BM}	m	metacentarski radijus
\overline{GM}	m	poprečna metacentarska visina
T_{roll}	s	period ljuljanja
i_φ	m	radijus tromosti mase oko osi x
T	m	gaz broda
C_{VP}	-	vertikalni prizmatički koeficijent
A_{WP}	m ²	površina vodne linije
C_M	-	koeficijent punoće glavnog rebra
C_B	-	koeficijent punoće istisnine
B	m	širina broda
C_I	-	koeficijent korekcije
C_{WP}	-	koeficijent punoće vodne linije
D_S	m	visina broda s nadgrađem
\overline{GM}_{period}	m	metacentarska visina određena na temelju perioda
$\overline{GM}_{\% širine}$	m	metacentarska visina određena na temelju širine
\overline{KM}	m	udaljenost metacentra od kobilice
D	m	visina broda
I_T	m ⁴	moment tromosti površine vodne linije u poprečnom smjeru
r_{xx}	m	radijus tromosti mase oko osi x
r_{yy}	m	radijus tromosti mase oko osi y
r_{zz}	m	radijus tromosti mase oko osi z
L	m	duljina broda
$F(\omega_i, \omega_j)$	N	niskofrekventno valno opterećenje drugog reda
$F_q(\omega_i, \omega_j)$	N	valno opterećenje prvog reda
$F_p(\omega_i, \omega_j)$	N	valno opterećenje drugog reda

ω_i	rad/s	frekvencija nailaznog vala
ω_j	rad/s	frekvencija nailaznog vala
ϕ_7	m ² s	kompleksni potencijal valova difrakcije
ϕ_k	m ² s	kompleksni potencijal valova radijacije
ϕ_0	m ² s	kompleksni potencijal nailaznog vala
$F_0(\omega_i)$	N	član nultog reda kvadratne prijenosne funkcije
$F_1(\omega_i)$	N	član prvog reda kvadratne prijenosne funkcije
F_q^1	N	valno opterećenje prvog reda
F_{p1}^1	N	valno opterećenje drugog reda i difrakcija
F_{p2}^1	N	korekcija rubnih uvjeta na trupu
F_{p3}^1	N	utjecaj tlaka duž slobodne površine
$F_2(\omega_i)$	N	član drugog reda kvadratne prijenosne funkcije
ϕ	m ² s	potencijal brzine prvog reda
ϕ_n	m ² s	derivacija potencijala brzine prvog reda
ϕ^*	m ² s	konjugirano kompleksni potencijal brzine prvog reda
ϕ_n^*	m ² s	konjugirano kompleksna derivacija potencijala brzine prvog reda
η_a	m	amplituda odziva
H_{Ra}	m/m, °/m	prijenosna funkcija
ω_{irr}	rad/s	iregularna frekvencija
L_{wl}	m	duljina vodne linije
M	kg	matrica mase tijela i momenata tromosti mase
A	kg, kgm, kgm ²	matrica dodatne mase
B	kg/s, kgm/s, kgm ² /s	matrica prigušenja
C_{jk}	kg/s ² , kgm/s ² , kgm ² /s ²	matrica povratnih sila
$F_j(t)$	N	hidrodinamička uzbudna sila

SAŽETAK

Dodatni otpor na valovima važno je predvidjeti već u ranoj fazi projektiranja broda. Povećanje otpora uzrokovano valovima utječe na brzinu broda i potrošnju goriva te može predstavljati značajan problem s aspekta očuvanja okoliša. Dodatni otpor broda na valovima je nelinearna hidrodinamička sila drugog reda koja ovisi o gibanjima broda, a nastaje uslijed interakcije valnog sustava broda i nailaznih valova.

U radu je dana teorijska osnova dodatnog otpora broda na valovima te rezultati numeričkog proračuna dodatnog otpora na pravilnim valovima za tri različite forme broda. Numerički proračuni provedeni su u programskom paketu HydroSTAR, koji se temelji na linearnoj teoriji potencijalnog strujanja. Numerički dobiveni rezultati dodatnog otpora broda na valovima uspoređeni su s eksperimentalnim podacima dostupnim u literaturi. Osim pravilnih valova u pramac, dodatni otpor određen je i za različite kutove nailaska valova.

Značajke mase broda su nužni ulazni parametri za proračun dodatnog otpora broda na valovima, koji često nisu poznati u preliminarnoj fazi projektiranja. Stoga ih je potrebno što točnije procijeniti kako bi rezultati dodatnog otpora broda na valovima bili što pouzdaniji. Iz tog razloga, u radu su prikazane metode određivanja položaja težišta mase broda po visini i radijusa tromosti mase te je analiziran njihov utjecaj na dodatni otpor broda na valovima. Budući da brod provede oko 40-50% svog radnog vijeka u balastnom stanju, dodatni otpor broda na valovima proračunat je i za balastno stanje te su dobiveni rezultati uspoređeni s rezultatima dodatnog otpora broda na valovima za stanje punog opterećenja.

Ključne riječi: *dodatni otpor na valovima, potencijalno strujanje, valna opterećenja, pomorstvenost, QTF, sila zanošenja*

SUMMARY

It is important to predict the added resistance in waves already in early stage of ship design. The increase in resistance due to waves affects the ship speed and fuel consumption and can represent significant problem from the aspect of environmental protection. The added resistance in waves is the nonlinear hydrodynamic force of the second order which depends on the ship motions and is caused by the interaction of the ship wave system and the incoming waves.

The paper provides a theoretical basis for the added resistance in waves and the results of the numerical calculation of the added resistance in regular waves for three different ship forms. The numerical calculations are carried out utilizing HydroSTAR program package, based on the linear theory of potential flow. The numerical results of the added resistance in waves are compared with the experimental data available in the literature. In addition to regular head waves, the added resistance is also determined for different incident angles.

The ship mass characteristics are necessary input parameters for calculation of the added resistance in waves and they are often unknown in the preliminary design stage. Therefore, they need to be accurately evaluated to ensure that the results of the added resistance in waves are as reliable as possible. For this reason, the methods for the determination of center of gravity and the gyration radii are presented within this paper and their effect on the added resistance in waves is analysed. Since ship spends approximately 40-50% of her total voyage time in the ballast condition, the added resistance in waves is calculated for the ballast condition as well. The obtained results are compared with the results of added resistance in waves for the full load condition.

Key words: *added resistance in waves, potential flow, wave loads, seakeeping, QTF, drift force*

1. UVOD

Jedan od temeljnih zahtjeva prilikom projektiranja broda je postizanje određene brzine i nosivosti broda uz što manji otpor. Gubitak brzine broda mogu uzrokovati mnogi faktori od kojih je najvažniji dodatni otpor na valovima. Uslijed plovidbe broda na valovima dolazi do povećanja otpora te se značajno smanjuje brzina broda u odnosu na plovidbu na mirnoj vodi. Kako bi se održala nominalna brzina broda na valovima potrebno je povećati snagu pogonskog stroja. Zbog povećanja snage pogonskog stroja, te ujedno i povećanja potrošnje goriva, dodatni otpor na valovima potrebno je odrediti sa što većom preciznošću. Dodatni otpor na valovima također ima sve veću važnost s aspekta zaštite okoliša obzirom na postavljene zahtjeve za smanjenje emisije štetnih plinova kroz projektni indeks energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Index*, EEDI), stoga ga je nužno predvidjeti već u ranoj fazi projektiranja broda.

Ukupni otpor sastoji se od više komponenti pri čemu su najznačajnije:

- otpor na mirnoj vodi koji je konstantan pri određenoj brzini, R_{SW} ,
- otpor uslijed vjetra koji je ovisan o brzini broda te o brzini i smjeru vjetra, R_W ,
- dodatni otpor na valovima koji je ovisan o brzini broda, značajnoj valnoj visini i kutu nailaska na valove, R_{AW} :

$$R_T = R_{SW} + R_W + R_{AW} \quad (1)$$

gdje je R_T ukupni otpor broda.

Plovidba broda pod utjecajem vjetra i valova uzrokuje dodatno opterećenje broskog vijka te tako smanjuje njegovu korisnost što dovodi do tzv. nenamjernog smanjenja brzine broda.

Porast dodatnog otpora, odnosno smanjenje brzine broda najviše je izraženo tijekom plovidbe pri težim vremenskim uvjetima. Zbog toga je optimizacija plovnog puta postala neizostavni dio procesa planiranja plovnog puta, kako iz ekonomskih razloga tako i zbog povećanja sigurnosti posade i broda te smanjenja emisije štetnih plinova.

1.1. Dodatni otpor broda na valovima

Dodatni otpor broda na valovima je dodatni inducirani gubitak energije broda. Naime, brod prilikom plovidbe generira dvije vrste valova; valove uslijed napredovanja u mirnoj vodi i valove uslijed gibanja uzrokovanih nailaznim valovima. Za generiranje navedenih valova potrebna je određena količina energije.

Utrošena energija broda izražena u obliku valova, prema teoriji pomorstvenosti, može se razložiti na tri komponente kako slijedi [1]:

1) Dodatni otpor uslijed vertikalnih gibanja

Ova komponenta nastaje uslijed interferencije nailaznih valova i valova prouzročenih gibanjem broda, posebice poniranjem i posrtanjem (radijacijski valovi). Ta komponenta je poznata kao sila zanošenja i ima najveći udio u dodatnom otporu na valovima u području dugih valova odnosno pri niskim valnim frekvencijama.

2) Dodatni otpor uslijed difrakcije

Nailazni valovi reflektiraju se o trup broda i međusobno djeluju s valovima radijacije. Ova komponenta je poznata kao difrakcijska i javlja se uslijed interakcije nailaznih valova i broda. U području kratkih valova odnosno pri visokim valnim frekvencijama ova komponenta je najznačajnija, dok je području umjerenih do niskih frekvencija zanemarivo mala.

3) Dodatni otpor uslijed viskoznih učinaka

Sila prigušenja uslijed viskoznih učinaka povezana je s prisilnim poniranjem i posrtanjem u mirnoj vodi.

Navedene tri komponente dodatnog otpora uzrokuju gubitak (disipaciju) energije kao posljedicu prijenosa energije od broda prema vodi te generiranjem valova od broda.

Od ukupne energije najveći dio je utrošen na energiju radijacijskih valova odnosno brod najveći dio energije oscilatornim gibanjem predaje valovima, a vrlo mali udio energije se izgubi zbog trenja uslijed viskoznosti fluida. Naime, energija utrošena trenjem koje se javlja uslijed viskoznosti fluida je vrlo mala i gotovo zanemariva zbog toga što je viskozno prigušenje neznajno u usporedbi s hidrodinamičkim prigušenjem gibanja broda. Iz toga slijedi zaključak da se dodatni otpor na valovima može razmatrati kao neviskozna pojava, što je vrlo važno kod korelacije izmjerenih podataka na modelu na brod u naravi. To se postiže na način da se dodatni

otpor modela broda pomnoži s kubom odgovarajućeg koeficijenta α , koji je ovisan o formi broda, na sljedeći način [1]:

$$\frac{R_{AW_S}}{R_{AW_M}} = \alpha^3 \quad (2)$$

Smatra se da sila zanošenja ima najveći utjecaj od tri prethodno navedene komponente dodatnog otpora na valovima. Slijedi ga sila prigušenja te difrakcijska komponenta koja je ujedno i najmanje značajna od svih komponenti osim u području vrlo kratkih valova.

Važno je naglasiti da sve tri komponente dodatnog otpora na valovima imaju mogućnost superpozicije te su proporcionalne s kvadratom amplitude vala. S ciljem boljeg razumijevanja pojave dodatnog otpora na valovima moguće je odvojeno razmatrati te tri komponente, ali u naravi sve tri komponente djeluju istovremeno te su međusobno povezane. U praksi je moguće svaku komponentu odrediti posebno, bilo odabranim analitičkim metodama ili posebnim eksperimentalnim ispitivanjima.

1.1.1. Dodatni otpor uzrokovan gibanjima broda

Dodatni otpor uzrokovan gibanjima broda nastaje uslijed radijacijskih valova kao posljedice gibanja broda. Radijacijski valovi postaju veći kada je relativna elevacija vala veća, a posebno u slučaju kada je relativna elevacija vala veća od elevacije nailaznog vala. Najveći utjecaj na relativnu elevaciju vala imaju poniranje i posrtanje te njihovi fazni pomaci u odnosu na nailazne odnosno susretne valove [1]. Ljuljanje broda ima mali utjecaj na relativnu elevaciju vala, ali u usporedbi s poniranjem i posrtanjem gotovo je zanemarivo.

Posebno je zanimljiv slučaj kada je duljina vala približno jednaka duljini broda, jer je tada amplituda posrtanja, a ujedno time i relativna elevacija vala i dodatni otpor veći. Iz tog je razloga omjer između duljine broda i duljine vala L_{pp}/λ važan parametar u određivanju dodatnog otpora broda na valovima.

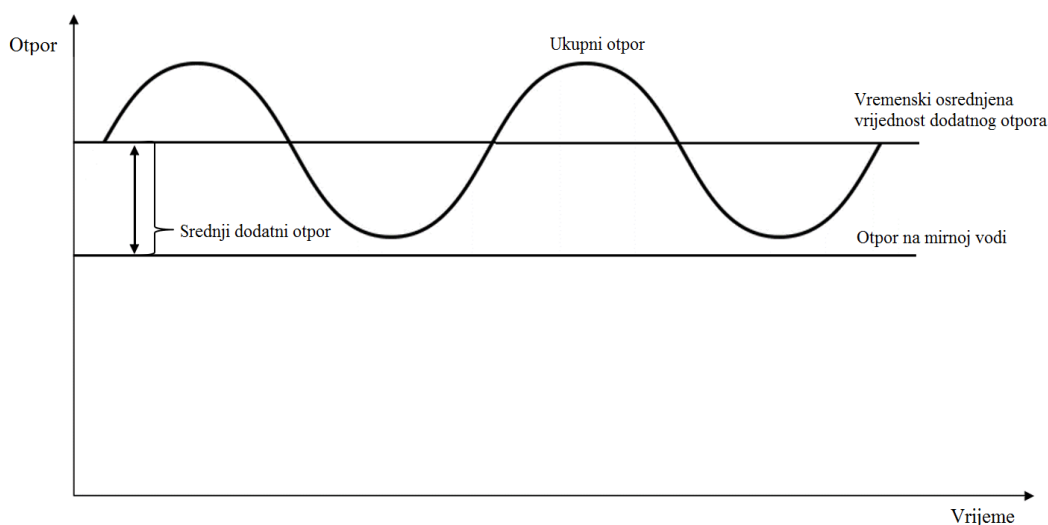
Kada je duljina vala približno jednaka duljini broda ($L_{pp}/\lambda \sim 1$) brod se giba zajedno s valovima i relativna elevacija vala teži k nuli, što ujedno rezultira i smanjenjem radijacijskih valova i dodatnog otpora. Pokazalo se da u slučajevima kada je $L_{pp}/\lambda < 0,5$ dodatni otpor induciran gibanjima jednak je nuli [1]. To se događa i u slučaju kod vrlo kratkih valova ($L_{pp}/\lambda \gg 1$), gdje su apsolutna gibanja broda mala i gdje je relativna elevacija vala približno jednaka elevaciji nailaznog vala.

1.1.2. Dodatni otpor uzrokovan difrakcijom valova

U slučaju vrlo kratkih valova ($L_{pp}/\lambda \gg 1$) dodatni otpor proizlazi iz difrakcije vala od trupa broda. Kad je valna duljina mnogo veća od duljine broda ($L_{pp}/\lambda \ll 1$) tada valna difrakcija teži k nuli pa se brod giba zajedno s valovima. Dakle, utjecaj difrakcije vala treba uzeti u obzir tek kada je $L_{pp}/\lambda \leq 1$.

1.2. Vremenski osrednjena vrijednost dodatnog otpora broda na harmonijskim valovima

Vremenski osrednjena vrijednost dodatnog otpora broda je uzdužna komponenta stacionarne valne sile drugog reda [1]. Tijekom plovidbe broda na valovima vrijednost otpora broda ciklički se mijenja. Ukupni otpor broda sastoji se od otpora na mirnoj vodi koji je konstantan pri određenoj brzini i dodatnog otpora na valovima koji se mijenja sa susretnom frekvencijom valova kao što je prikazano na slici 1. Srednja vrijednost promjenjivog dijela otpora u zadanom vremenu naziva se srednji dodatni otpor na harmonijskim valovima R_{AW} [2].



Slika 1. Prikaz vremenski osrednjene vrijednosti dodatnog otpora broda na valovima [2]

1.3. Dodatni otpor kao problem drugog reda

Obzirom da su vremenski osrednjene vrijednosti harmonijskog vala, amplitude A i perioda T_e jednake nuli, izračun srednje vrijednosti sile također će rezultirati nulom kao srednjom vrijednošću [1]:

$$\frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} A \cos(\omega t + \varepsilon) dt = 0 \quad (3)$$

U slučaju harmonijskog vala drugog reda osrednjena vrijednost sile u vremenu bit će različita od nule:

$$\frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} (A \cos(\omega t + \varepsilon))^2 dt = \frac{A^2}{2} \quad (4)$$

Kvadratni član u odzivu broda potrebno je uzeti u obzir iako je manji u usporedbi s linearnim članom. Dodatni otpor na pravilnim valovima mijenja se linearno s kvadratom visine vala u odnosu na konstantnu valnu duljinu [1].

Prilikom predviđanja dodatnog otpora na valovima potrebno je uzeti u obzir činjenicu da ukoliko se gibanja broda predvide s točnošću 10-15%, nije moguće očekivati točnost dodatnog otpora u postotku većem od 20-30% [1], stoga je važno što točnije predvidjeti vertikalna gibanja broda.

Iako je dodatni otpor problem drugog reda, moguće ga je odrediti na temelju potencijala brzine linearnog vala.

Dodatni otpor, kao prirast otporu na mirnoj vodi, uzrokovan valovima u uzdužnom smjeru broda može se izraziti na sljedeći način [3]:

$$\begin{aligned} R_{AW} &= \int_S (-\rho g z + P) n_1 dS = \\ &= \overline{\int_S (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot n_1 dS} + \overline{\int_S [\rho g (\xi_4 y - \xi_5 x) + \Delta P^{(1)}] \cdot n_1 dS} + \\ &+ \overline{\int_{\Delta S} (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot n_1 dS} + \overline{\int_S (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot \Delta n_1 dS} + \\ &+ \overline{\int_S P^{(2)} dS} + O(\zeta_a^3) \end{aligned} \quad (5)$$

gdje je:

ρ - gustoća fluida,

g - ubrzanje zemljine sile teže,

P - dinamički tlak,

n_1 - uzdužna komponenta vektora normale,

$P^{(1),(2)}$ - dinamički tlak fluida prvog i drugog reda,

$\Delta P^{(1)}$ - promjena $P^{(1)}$ na površini trupa uslijed gibanja broda,

Δn_1 - promjena x komponente normale na oplatu broda uslijed poniranja i posrtanja,

ξ - elevacija vala,

ζ_a - jedinična valna amplituda,

S - oplakana površina broda.

Kao što je vidljivo iz izraza (5), integracija hidrodinamičkog tlaka za određivanje dodatnog otpora numeričkom integracijom je dosta složena.

Integral $\int_S [\rho g (\xi_4 y - \xi_5 x) + \Delta P^{(1)}] \cdot n_1 dS$ u izrazu (5) predstavlja korekciju tlaka u referentnoj

točki oplakane površine, dok integral $\int_{\Delta S} (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot n_1 dS$ predstavlja doprinos tlaka na

uronjeni ili izronjeni dio oplakane površine uslijed gibanja broda i elevacije vala. Utjecaj promjene smjera tlaka u odnosu na os x , koja je nepomična u prostoru, predstavlja integral

$$\int_S (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot \Delta n_1 dS.$$

1.4. Teorija potencijalnog strujanja

Potencijalno strujanje je strujanje čije se polje brzine može u potpunosti opisati funkcijom potencijala brzine strujanja [4]. Na temelju tog potencijala moguće je odrediti brzine i ubrzanja čestica fluida, hidrostatički i hidrodinamički tlak te energiju vala. Pretpostavke na kojima se temelji potencijalno strujanje je svojstvo bezvrtložnosti, neviskoznosti i nestlačivosti fluida.

Dva uvjeta su nužna da bi se polje brzine strujanja moglo opisati potencijalom brzine strujanja. Prvi uvjet koji je potrebno zadovoljiti je uvjet bezvrtložnosti potencijalnog strujanja, odnosno da ne postoji rotacija čestica fluida. U tom slučaju polje brzine se može opisati neprekinutom skalarnom funkcijom koja ima konačnu vrijednost u svakoj točki tekućine i definira vektor brzine u toj točki. Ta funkcija se naziva funkcijom potencijala brzine strujanja.

Za bezvrtložno strujanje vrijedi:

$$\text{rot } \vec{v} = \nabla \times \vec{v} = 0 \quad (6)$$

gdje je \vec{v} vektor brzine strujanja fluida.

Slijedi:

$$\left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \vec{k} = 0 \quad (7)$$

gdje su v_x, v_y i v_z komponente vektora brzine strujanja u smjeru koordinatnih osi.

Potencijal brzine strujanja Φ matematička je funkcija bez fizikalnog značenja no ima svojstvo da je brzina u bilo kojem smjeru u određenoj točki fluida jednaka derivaciji funkcije potencijala u tom smjeru [2]:

$$\begin{aligned}\vec{v}(x, y, z; t) &= \text{grad } \Phi(x, y, z; t) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \Phi(x, y, z; t) \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \Phi(x, y, z; t) \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \Phi(x, y, z; t) \vec{k} \\ &= v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}\end{aligned}\quad (8)$$

Potencijal brzine i strujna funkcija Ψ mogu se povezati matematičkom funkcijom za koju vrijede slijedeći izrazi:

$$\begin{aligned}v_x &= \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v_y &= -\frac{\partial \Psi}{\partial x}\end{aligned}\quad (9)$$

Izrazi vrijede za dvodimenzijско strujanje odnosno za $v_z = 0$. Strujnica je krivulja za koju vrijedi $\Psi = \text{const}$. Volumen fluida između dvije strujnice proporcionalan je razlici vrijednosti strujnih funkcija između tih strujnica.

Drugi uvjet je kontinuitet mase fluida koji proizlazi iz zakona očuvanje mase odnosno iz jednadžbe kontinuiteta. Jednadžba kontinuiteta određuje se na temelju sume protoka fluida u sva tri smjera elementarnog volumena [2]. Gustoća fluida u tom je slučaju konstantna za razliku od gustoće stlačivog fluida koja je funkcija položaja unutar elementarnog volumena. Jednadžba kontinuiteta homogenog nestlačivog fluida poznata je kao Laplaceova jednadžba, koja mora biti zadovoljena u cijeloj domeni, te osigurava konzervativnost i solenoidalnost strujanja:

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{v} &= \Delta \Phi = 0\end{aligned}\quad (10)$$

gdje je Δ Laplaceov operator.

Potencijal brzine vala Φ_w mora zadovoljiti četiri rubna uvjeta [2]:

- Jednadžbu kontinuiteta ili Laplaceovu jednadžbu koja govori o očuvanju mase, odnosno uvjetu nestlačivosti idealne tekućine:

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

- Rubni uvjet na morskom dnu koji proizlazi iz uvjeta nepromočivosti dna, a prema kojem je brzina u smjeru normale na površiniorskog dna jednaka nuli:

$$v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad \text{za} \quad z = -d \quad (12)$$

- Kinematički rubni uvjet koji propisuje da je brzina promjene elevacije slobodne površine jednaka vertikalnoj brzini gibanja čestice koja se nalazi na slobodnoj površini:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{za} \quad z = \zeta \quad (13)$$

- Dinamički rubni uvjet koji proizlazi iz pretpostavke o konstantnom tlaku na slobodnoj površini jednakom atmosferskom tlaku:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad \text{za} \quad z = 0 \quad (14)$$

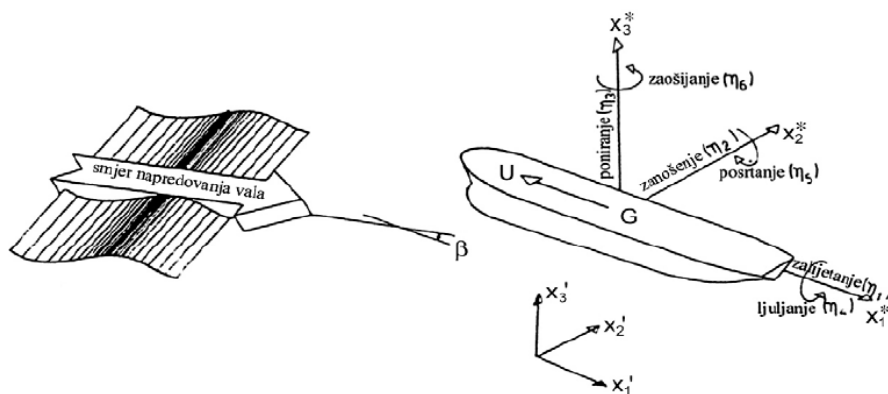
Zadovoljavanjem navedenih uvjeta moguće je izraziti potencijal brzine valova u vodi ograničene dubine na sljedeći način:

$$\Phi_w(x, z; t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\text{ch } k(d+z)}{\text{ch } kd} \sin(kx - \omega t) \quad (15)$$

gdje je d dubina.

U vodi neograničene dubine izraz $\frac{\text{ch } k(d+z)}{\text{ch } kd}$ u jednadžbi potencijala brzine strujanja (15) poprima oblik e^{kz} .

Klasičan pristup u teoriji pomorstvenosti temelji se na pretpostavci dostatne krutosti broda, tako da se uz zanemarivanje deformacija, može smatrati da brod na valovima oscilira kao kruto tijelo sa šest stupnjeva slobode što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Stupnjevi slobode gibanja broda [5]

Gibanja broda dijele se na translacijska i rotacijska. Translacijska gibanja su zalijetanje (eng. *surge*), zanošenje (eng. *sway*) i poniranje (eng. *heave*) dok su rotacijska ljuljanje (eng. *roll*), posrtanje (eng. *pitch*) i zaošijanje (eng. *yaw*). Samo poniranje, ljuljanje i posrtanje čista su oscilatorna gibanja kod kojih na brod djeluju povratna sila ili moment, koji nakon početnog poremećaja nastoje vratiti brod u ravnotežni položaj.

1.5. Metode određivanja dodatnog otpora broda na valovima

Vjerodostojna procjena dodatnog otpora broda na valovima vrlo je važna pri projektiranju broda kako zbog sigurnosti plovidbe u teškim vremenskim uvjetima tako i zbog smanjenja potrošnje goriva te emisije štetnih plinova. Netočno procijenjene pomorstvene karakteristike broda kao i dodatni otpor, mogu dovesti do ozbiljnih posljedica.

Dodatni otpor broda na valovima moguće je odrediti različitim metodama. Općenito se može dodatni otpor može odrediti pomoću tri metode: Near-field, Far-field i Middle-field metoda [6].

- Prva metoda temelji se na evaluaciji valnog polja prvog reda oko trupa broda duž vodne linije te određivanju gibanja prvog reda uzrokovanih tim valnim poljem (eng. *near-field formulation*). Direktnom numeričkom integracijom tlaka po oplakanoj površini na temelju definirane forme broda određuje se opterećenje na trup broda uslijed nailaznih valova kako slijedi:

$$F_{ij}' = \int_{S(t)} p(t) \vec{n} dS \quad (16)$$

gdje je:

F_{ij}' - sila zanošenja,

$p(t)$ - tlak na oplakanoj površini trupa.

- Druga metoda temelji se na zakonu o očuvanju količine gibanja (eng. *far-field formulation*). Uključuje opterećenje uzrokovano valnim poljem prvog reda i ima prednost pred prvom metodom zbog brže konvergencije rezultata prilikom određivanja sile zanošenja te zbog stabilnosti metode, no nedovoljno točno određuje vertikalne komponente sile zanošenja te kvadratnu prijenosnu funkciju (eng. *quadratic transfer function*, QTF) pri niskim frekvencijama što može biti od velike važnosti u vodi ograničene dubine.

Zakon o očuvanju količine gibanja u općenitom obliku glasi:

$$\frac{m d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \quad (17)$$

gdje je:

m - masa broda,

\vec{p} - impuls sile.

- Treća metoda kombinacija je integracije tlaka po oplakanoj površini te očuvanja količine gibanja unutar određenog kontrolnog volumena. Metoda omogućuje izračun svih komponenata opterećenja uslijed sila zanošenja te izračun QTF na niskim frekvencijama. Temelji se na zakonu očuvanja količine gibanja u kontrolnom volumenu ograničenom brodskim trupom te kontrolnom površinom koja okružuje trup. Integracija tlaka po oplakanoj površini trupa određuje se na polu-analitički način koristeći potencijale udaljene od trupa kao i u drugoj metodi (eng. *middle-field formulation*).

Navedene metode mogu se primijeniti u linearnoj i nelinearnoj teoriji potencijalnog strujanja. U slučaju linearne teorije potencijalnog strujanja, sila dodatnog otpora određuje se na temelju potencijala brzine odnosno hidrodinamičkog tlaka te potencijala perturbacije koji uključuje članove višeg reda [1].

Mnogi znanstvenici pokušali su odrediti dodatni otpor broda na valovima te su razvili brojne teorijske metode, no ne omogućuju sve metode zadovoljavajuće rezultate. Zanimljivo je spomenuti da je Faltisen 1980. godine predložio metodu za određivanje dodatnog otpora broda bez empirijskih korekcija koja se temelji na pojednostavljenom fizikalnom modelu difrakcije [1]. Za razliku od drugih metoda, Faltisenova metoda zahtjeva samo oblik vodne linije.

Metode koje se najčešće koriste pri određivanju dodatnog otpora na valovima prikazane su u nastavku.

1.5.1. Maruova metoda

Prvu cjelovitu analizu dodatnog otpora broda na valovima dao je Maruo 1957. godine [1]. Razvio je metodu za proračun nelinearnih hidrodinamičkih sila koje djeluju na brod, koji nema brzinu napredovanja, već se samo giba uslijed nailaznih valova. Maruo nije uzeo u obzir difrakciju valova pa je ova metoda davala netočne rezultate dodatnog otpora pri višim frekvencijama.

1.5.2. Havelockova metoda

Havelock je razvio metodu određivanja dodatnog otpora broda na valovima pod pretpostavkom da je srednja vrijednost sile otpora valova, određena iz jednadžbe gibanja, jednaka otporu valova. Zbog nedostatka informacija o svojstvenom poniranju i posrtanju, pretpostavlja se da su njihove amplitude približno jednakih vrijednosti. Havelockova metoda je utemeljena na integraciji uzdužne komponente tlaka nailaznog vala po oplakanoj površini trupa broda, zanemarujući pri tom činjenicu da i brod generira valove. Zbog toga je Havelock koristio Froude-Krylovljevu hipotezu te tako izbjegao kompleksno difrakcijsko rješenje, kao i spregu između dva gibanja, to jest poniranja i posrtanja [1].

Prema eksperimentalnim rezultatima, fazni pomaci poniranja i posrtanja su približno jednaki kod dugih valova. Značajnije povećanje otpora zapaženo je na kratkim valovima zbog valne difrakcije. Havelock ističe da su amplitude gibanja broda i njihovi fazni pomaci važni za izračun dodatnog otpora broda na valovima te da će se najveća vrijednost dodatnog otpora pojaviti u rezonantnom području poniranja i posrtanja.

Dodatni otpor na valovima prema Havelocku može se izraziti kao [1]:

$$R_{AW} = -\frac{k}{2} \left(F_{3a} \eta_{3a} \sin \varepsilon_{3F_3} + F_{5a} \eta_{5a} \sin \varepsilon_{5F_5} \right) \quad (18)$$

gdje je:

k - valni broj:

$$k = 2\pi / \lambda, \quad (19)$$

F_{3a} - amplituda uzbudne sile poniranja,

η_{3a} - amplituda poniranja,

ε_{3F_3} - fazni pomak između amplitude poniranja i uzbudne sile poniranja,

F_{5a} - amplituda uzbudne sile posrtanja,

η_{5a} - amplituda posrtanja,

ε_{5F_5} - fazni pomak između amplitude posrtanja i uzbudne sile posrtanja.

Iako Havelockova metoda određivanja dodatnog otpora broda u početku nije bila namijenjena za tu svrhu, ona pokazuje obećavajuće rezultate posebno u okviru preliminarne projekta.

Budući da je Havelock u svojoj metodi zanemario pojavu difrakcije vala, potrebno je korigirati dobivene rezultate za kratke valove, kako bi se dobila preciznija procjena povećanja otpora i na kratkim valovima. Dakle, Havelockova metoda može se koristiti u svrhu brze

procjene dodatnog otpora broda na valovima ukoliko su poznate amplitude odziva broda kao i njihovi fazni pomaci.

1.5.3. Joosenova metoda

Prema Joosenovoj metodi utjecaj difrakcije vala može biti zanemariv (osim kod vrlo kratkih valova gdje postaje značajan) obzirom na činjenicu da uzdužna komponenta sile zanošenja ovisi isključivo o potencijalu radijacije vala. Iako Joosenova metoda nije u potpunosti točna vrlo je jednostavna za upotrebu.

Dodatni otpor broda na valovima prema Joosenu može se izraziti kao [1]:

$$R_{AW} = \frac{\omega^3}{2g} (b_{33}\eta_{3a}^2 + b_{55}\eta_{5a}^2) \quad (20)$$

gdje je:

ω - valna frekvencija,

g - ubrzanje zemljine sile teže,

b_{33} - bezdimenzijski koeficijent prigušenja poniranja,

b_{55} - bezdimenzijski koeficijent prigušenja posrtanja.

1.5.4. Salvensenova metoda

Salvensen je razvio metodu temeljenu na izračunu uzdužne komponente valne sile drugog reda koja djeluje na brod. Teorijski, ovu metodu je moguće primijeniti i na nailazne valove pod drugim kutom. Sile i momenti koji djeluju na brod pri napredovanju određenom brzinom na valovima, opisao je potencijalom prvog reda.

Dodatni otpor na valovima prema Salvensenu se može izraziti kao [7]:

$$R_{AW} = \frac{ik}{2} \cos \beta (\eta_{3a} F_{3a} + \eta_{5a} F_{5a}) + R_\gamma$$

gdje je:

β - kut nailaska valova,

R_γ - difrakcijska komponenta sile.

1.5.5. Boeseova metoda

Boeseova metoda određivanja dodatnog otpora broda zahtjeva detaljnije ulazne podatke o gibanju broda. Boese 1970. godine razvija metodu kojom se integracijom tlaka po oplakanoj površini broda određuje vrijednost dodatnog otpora broda na valovima. Klasičnim hidrodinamičkim pristupom integracije uzdužnih komponenti oscilirajućih tlakova po oplakanoj površini trupa dolazi se do konačnog rješenja. Sila koja djeluje na trup broda podijeljena je na dva dijela, na srednju vrijednost uzdužne sile i silu na poprečni presjek trupa broda. Navedena podjela proizašla je iz vrpčaste teorije u kojoj se pretpostavlja da nema međuuutjecaja odsječaka u uzdužnom smjeru.

Dodatni otpor na valovima prema Boeseu može se izraziti na sljedeći način [7]:

$$R_{AW} = R_{AW1} + R_{AW2} = \frac{1}{2} \rho g \int_L (r_{3a}^2) \frac{dy_w}{dx_b} dx_b + \frac{1}{2} \rho \nabla \omega_e^2 \frac{\eta_{3a}}{\zeta_a} \frac{\eta_{5a}}{\zeta_a} \cos(\varepsilon_{3F_3} - \varepsilon_{5F_5}) \quad (21)$$

gdje je:

r_{3a} - relativna amplituda poniranja,

x_b - položaj težišta volumena vrpce,

y_w - poluširina vodne linije vrpce,

∇ - volumen istisnine broda,

ω_e - susretna frekvencija.

1.5.6. Gerritsmaova i Beukelmanova metoda

U ovoj metodi izjednačava se rad dodatnog otpora s energijom sadržanom u valovima radijacije koji se šire od broda. Ova metoda se još naziva i metoda rasipanja energije te se temelji na vrpčastoj teoriji i pogodna je za proračun dodatnog otpora broda za valove u pramac [8]. Gerritsmaova i Beukelmanova metoda razmatraju se zajedno, jer imaju isti način rješavanja. Jedina je razlika u tome što se Gerritsmaova metoda temelji na susretnoj frekvenciji, a Beukelmanova metoda na frekvenciji nailaznog vala. Dakle, Gerritsmaova i Beukelmanova metoda daje točnije rezultate od prethodno navedenih metoda zbog detaljnijeg opisa valne difrakcije, ali je i složenija za primjenu, jer zahtjeva točno poznavanje dodatne mase i prigušenja po presjecima trupa broda.

Dodatni otpor broda na valovima prema Gerritsmi i Beukelmanu može se izraziti kao [2]:

$$R_{aw} = \frac{-k \cos \beta}{2\omega_e} \int_0^L \left(b_{33} - U \frac{da_{33}}{dx_b} (v_{3a}^*)^2 \right) dx_b \quad (22)$$

gdje je:

U - brzina napredovanja broda,

a_{33} - bezdimenzijski koeficijent dodatne mase,

v_{3a}^* - vertikalna relativna brzina vrpce u vrpčastoj teoriji.

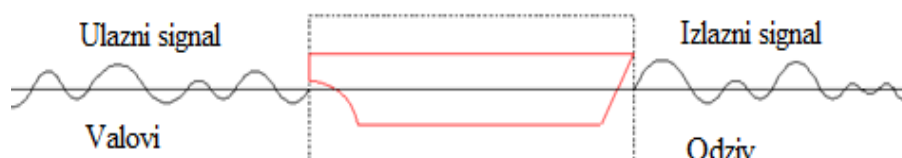
1.6. Hidrodinamički model

Interakcija broda i valova odnosno gibanje broda na valovima, vrlo je složen problem brodske hidrodinamike pa se s ciljem pojednostavljenog određivanja strujanja oko trupa broda i pojava u nailaznom valu koristi određena linearizacija. To omogućuje jednostavnije rješavanje složenih problema kao i brzu procjenu pojava uslijed interakcije broda i valova.

1.6.1. LTI sustav

Jedan od glavnih uzročnika dodatnog otpora broda na valovima su vertikalna gibanja broda. Kako bi se inducirala gibanja i sile na modelu broda najčešće se koristi vremenski nepromjenjiv linearni sustav to jest LTI sustav (eng. *Linear Time Invariant System*) [1].

Upotrebom LTI sustava brod se može promatrati kao sustav („crna kutija“), gdje ulazni signal predstavlja nailazne morske valove. To rezultira izlaznim signalom u obliku linearnog sinusoidalnog vala koji predstavlja odziv, odnosno gibanje ili silu kao što je prikazano na slici 3. LTI sustavu je omogućeno djelovanje s faznim pomakom ulaznog signala i linearna promjena amplitude. Ova ograničenja daju prednost LTI sustavu, jer je moguće primijeniti načelo superpozicije.



Slika 3. Princip rada LTI sustava [7]

1.6.2. Načelo superpozicije

Ako je signal $x(t)$ moguće izraziti kao sumu pod-signala $x_k(t)$, tada je i signal odziva suma odziva pod-signala $y_k(t)$. To se naziva načelom superpozicije. Ulazni signal sastoji se od određenog broja različitih frekvencijskih komponenti koje se mijenjanju kako bi se prema karakteristikama filtera proizveo izlazni signal. Uskopojasni filter koji predstavlja prijenosnu funkciju, prigušit će komponente ulaznog signala s visokom frekvencijom dok će komponentama s nižom frekvencijom omogućiti prolazak bez da utječe na njih kako slijedi [7]:

$$x(t) = \sum_k x_k(t) \rightarrow y(t) = \sum_k y_k(t) \quad (23)$$

Zbog toga se gibanje broda i sile na nepravilnim valovima mogu izraziti kao superpozicija odziva na pravilnim valovima, čineći vremenski nepromjenjivu linearnu teoriju korisnom za analizu dodatnog otpora na valovima za određeno stanje mora.

Za modeliranje odziva pomoću LTI sustava, odziv gibanja broda mora biti lineariziran. Obzirom da je linearni dio dominantan, gibanje broda na valovima smatra se problemom prvog reda. Međutim, linearna teorija ima ograničenu primjenu ukoliko valna strmina postaje prevelika, jer tada nelinearni učinak postaje sve važniji.

1.6.3. Gibanje broda na nepravilnim valovima

U realnim uvjetima plovidbe ne postoje pravilni valovi te se oni primjenjuju samo u modelskim ispitivanjima i u numeričkim simulacijama. Međutim, uzevši u obzir spomenuti princip superpozicije može se smatrati da je odziv broda na nepravilnim valovima jednaki sumi odziva na pravilnim valovima različitih frekvencija. Pri niskim valnim frekvencijama odnosno kod dugačkih valova, poniranje broda je u potpunosti ujednačeno s gibanjem vala. S druge strane, kod viših valnih frekvencija kada brod nailazi na valove male duljine, amplitude gibanja broda poprimaju male vrijednosti.

Važnost superpozicije pravilnih valova je u relativno jednostavnom određivanju odziva broda na nepravilnim valovima.

1.7. Panelna metoda

Postoji više numeričkih metoda pomoću kojih se u trodimenzijskom prostoru može riješiti problem gibanja broda na harmonijskim valovima, odnosno određivanje potencijala brzine kod radijacijsko - difrakcijskog problema. Najpoznatije su vrpčasta metoda (eng. *strip method*) i panelna metoda (eng. *panel method*).

Za dobivanje numeričkog rješenja Laplaceove jednadžbe koristi se tzv. panelna metoda ili metoda rubnih uvjeta (eng. *Boundary Element Method*, BEM) [6]. U metodi se koristi razdioba izvora po površini tijela i eventualno slobodnoj površini. Površina tijela i dio slobodne površine diskretizira se pomoću četverokutnih panela na kojima su smješteni izvori čija se jakost određuje na temelju rubnih uvjeta. Glavna prednost metode je u tome što daje potpuno rješenje uz odgovarajuće rubne uvjete te značajna ušteda u potrebnom proračunskom vremenu u odnosu na potrebno vrijeme trajanja proračuna na temelju teorije viskoznog strujanja fluida.

Panelne metode dijele se na panelnu metodu na temelju Greenovog integralnog teorema i metodu uzdignutih panela.

1.7.1. Panelna metoda na temelju Greenovog integralnog teorema

Panelna metoda temeljena na Greenovom integralnom teoremu koristi se kako bi se odredila gibanja broda i valna opterećenja prvog i drugog reda koja djeluju na trup broda. Prema Greenovom teoremu moguće je transformirati trodimenzijsku linearnu homogenu diferencijalnu jednadžbu (Laplaceovu jednadžbu) u površinsku integralnu jednadžbu [10]. Time je trodimenzijski hidrodinamički problem sveden na dvodimenzijski (površinski) problem. Površina tijela je podijeljena na n panela dovoljno malih dimenzija da je moguće pretpostaviti kako su izvori, odnosno ponori konstantne jakosti po cijeloj površini svakog elementa. Zadovoljavanjem rubnih uvjeta, Greenova funkcija povezuje jakosti izvora i ponora s potencijalom brzine strujanja na svakom panelu te je njezino rješenje moguće ukoliko je poznat potencijal nailaznog vala. Na taj način, moguće je poznavajući potencijal brzine odrediti hidrodinamičke sile integracijom tlakova. Problem se rješava u frekvencijskoj domeni koja omogućuje određivanje dodatnog otpora broda na harmonijskim valovima različitih valnih duljina i frekvencija. Porast brzine broda je uzet u obzir kroz susretnu frekvenciju nailaznih valova.

Greenova funkcija G predstavlja polje potencijala brzine u točki polja $P(x, y, z)$ koje je uzrokovano izvorom jedinične gustoće u singularnoj točki $Q(x', y', z')$ [10] :

$$4\pi\Phi(P) = \iint_S dS(\Phi_n G - \Phi G_n) + I_F(\Phi) \quad (24)$$

gdje je I_F integral slobodne površine.

Integral slobodne površine se transformira u linearni integral za rješenje difrakcije i radijacije vala oko trupa broda koji napreduje konstantnom brzinom, a za slučaj kada nema brzine napredovanja, ovaj integral teži k nuli [10].

Kako bi se primijenila Greenova funkcija potrebno je zadovolji rubni uvjet na lineariziranoj slobodnoj površini, oplakanoj površini trupa i morskom dnu [2]:

$$-k\varphi + \frac{\partial\varphi}{\partial z} = 0 \quad \text{na } z = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = v_n \quad \text{na oplakanoj površini} \quad (26)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial z} = 0 \quad \text{na morskom dnu} \quad (27)$$

Radijacijski uvjet u beskonačnost idealna tekućina zadovoljava sama po sebi [10]:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \left[\sqrt{R} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial R} - ik\varphi \right) \right] = 0 \quad (28)$$

Određivanje rješenja Greenove funkcije je složenije što je veći broj rubnih uvjeta koje je potrebno zadovoljiti.

Greenova funkcija je definirana Fourierovom superpozicijom elementarnih valova te se dijeli na stacionarnu i nestacionarnu komponentu [6]. Iako je u linearnoj teoriji moguće odvojeno rješavati svaku komponentu, problem rubnih vrijednosti za određivanje nestacionarnih komponenti potencijala brzine strujanja ne može se riješiti bez uzimanja u obzir međudjelovanje obje komponente ukupnog potencijala. Najčešće korištena metoda za računalnu provedbu diskretne Fourierove transformacije je tzv. brza Fourierova transformacija (eng. *Fast Fourier Transform*, FFT) koja smanjuje broj potrebnih operacija te se brzo dolazi do rješenja [11].

Važno je spomenuti da u slučaju kada je točka polja blizu izvora panela, javlja se singularitet te se vrši analitička integracija Greenove funkcije. S druge strane, kada su izvor panela i točka polja blizu slobodnoj površini, logaritamska singularnost na visokim susretnim frekvencijama vodi do pojave iregularnih frekvencija.

Kada brod ima brzinu napredovanja vrlo malu ili jednaku nuli, rezultati hidrodinamičkog proračuna 3D panelnom metodom su zadovoljavajuće točnosti, čak i onda kada se koristi mali broj panela. Naime, veći broj panela na površini trupa ne doprinosi mnogo točnosti rezultata.

Smatra se da 3D panelna metoda daje rezultate zadovoljavajuće točnosti za područje niskih do umjerenih brzina. Međutim, pri razmatranju brzine napredovanja i viših frekvencija nailaznih valova preporuka je da duljina panela ne prelazi 20% najmanje valne duljine. Ukoliko to nije moguće postići, paneli na unutarnjoj slobodnoj površini, koji se koriste za eliminaciju iregularnih frekvencija, trebali bi biti manjih dimenzija kako bi se iregularne frekvencije eliminirale ili eventualno njihova pojava premjestila u raspon viših frekvencija.

1.7.2. Metoda uzdignutih panela

U metodi uzdignutih panela rješenje nelinearnog problema interakcije broda i nailaznih valova određuje se iteracijskim rješavanjem niza lineariziranih problema. Odnosno, postupkom iteracije se elevacija na slobodnoj površini prilagođava realnim uvjetima sve dok se ne postigne zadovoljavajuća točnost. Kao što je već spomenuto, panelna metoda koristi Laplaceovu jednadžbu za opis potencijalnog strujanja te je sukladno tome potrebno zadovoljiti sve rubne uvjete. Glavni je problem zadovoljiti dinamički rubni uvjet koji nije linearan i to na površini koja nije unaprijed poznata. Iz tog razloga pristupa se linearizaciji problema u kojem je potencijal brzine suma potencijala iz prethodne iteracije i poremećajnog potencijala preko kojeg je uključen utjecaj valovite slobodne površine. Ova metoda se još naziva i metoda Rankinovih izvora [1].

Potrebno je formirati mrežu panela s izvorima konstantne jakosti po oplakanoj površini, ali i na slobodnoj površini. Kako nije moguće diskretizirati neograničenu slobodnu površinu, potrebno je približno odrediti njezinu veličinu, a da pritom pretpostavljena slobodna površina ne utječe negativno na rezultate i vrijeme trajanja proračuna. Veličina i broj panela slobodne površine ovise o brzini broda, odnosno o Froudeovom broju. Za veće Froudeove brojeve potrebno je uzeti u obzir veće područje slobodne površine, posebice iza krme broda i u poprečnom smjeru, dok se za manje Froudeove brojeve preporuča uzeti veći broj manjih panela na manjem području.

U ovoj metodi početno se definiraju paneli na oplakanoj površini te paneli na nekoj visini iznad početne slobodne površine. Na površini svakog panela određuje se jedna kolokacijska točka u kojoj trebaju biti zadovoljeni rubni uvjeti i koja zajedno s vektorom normale i površinom panela čini glavne karakteristike svakog panela. Iz toga proizlazi sustav jednadžbi čije je rješenje jakost

izvora. Potom se računaju brzine i tlakovi u odgovarajućim točkama, nova elevacija slobodne površine te otpor valova. Vrlo je važno da visina na kojoj se nalaze paneli s izvorima bude veća od valne elevacije dok su kolokacijske točke na trenutnoj slobodnoj površini približno ispod težišta panela. Ukoliko navedeni kriterij nije zadovoljen, nastavlja se iteracija sve dok se ne postigne zadovoljavajuće rješenje.

1.7.3. Primjena i ograničenja

Numerički modeli za određivanje valnih opterećenja i gibanja broda mogu se kategorizirati prema domeni proračuna (frekvencijska i vremenska domena), vrsti korištenih singulariteta (Green ili Rankin), dimenzioniranju problema (2D ili 3D) te prema složenosti problema (linearni ili viši red) [1].

Vremenska i frekvencijska domena dva su različita pristupa istom dinamičkom sustavu te ne postoje razlike u informacijama prilikom promjene domene. One se međusobno nadopunjuju te vode do cjelovitog prikaza dinamičkog sustava.

1.7.3.1. Frekvencijska domena

Frekvencijska domena omogućuje određivanje odziva broda na harmonijskim valovima različitih valnih duljina i smjera nailaska vala. Nedostaci analize u frekvencijskoj domeni su njihovo ograničenje na harmonijske valove i njihova nemogućnost određivanja trenutnih valnih elevacija prilikom izračuna odziva gibanja.

1.7.3.2. Vremenska domena

U vremenskoj domeni moguće je procijeniti sile koje djeluju na brod za dana gibanja u jedinici vremena te je na temelju tih podataka moguće procijeniti gibanja u određenoj vremenskoj točki. Analiza gibanja broda u vremenskoj domeni češće se primjenjuje u analizi nelinearne uzbude vala, opterećenja konstrukcije, hidroelastičnosti, udaranja pramca o valove i elastičnog odziva, gibanja tekućine u djelomično punim tankovima i sličnih problema. Može se zaključiti kako primjena vremenske domene u rješavanju različitih hidrodinamičkih problema postaje sve popularnija i sofisticiranija.

1.8. Dodatni otpor broda u balastnom stanju

Gaz broda mijenja se ovisno o stanju krcanja. Iako se dodatni otpor broda na valovima uobičajeno određuje za stanje punog opterećenja, brod 40-50% svog operativnog vremena provede u balastnom stanju. U balastnom stanju, strujanje fluida oko trupa broda kao i valna interferencija mijenjaju se u usporedbi sa stanjem punog opterećenja uslijed izraženijih gradijenata brzina i tlakova [12].

Također, u usporedbi sa stanjem punog opterećenja, u području kratkih valova, gdje je dominantna difrakcijska komponenta dodatnog otpora broda, ukupni dodatni otpor broda na valovima u balastnom stanju je veći. Uslijed većih relativnih gibanja broda na kratkim valovima te značajnije efektivne promjene oplakane površine trupa broda, u balastnom stanju dolazi do povećanja difrakcijskog dijela dodatnog otpora. Isto tako, u balastnom stanju položaj maksimalne vrijednosti dodatnog otpora broda na valovima pomiče se prema višim valnim frekvencijama.

Oblik vodne linije također se mijenja ovisno o gasu. Na krmi se vodna linija značajnije mijenja s gazom, dok na pramcu, što je mnogo važnije za dodatni otpor na valovima, vodna se linija ne mijenja u značajnijoj mjeri [12].

Promjena oblika forme trupa u vertikalnom smjeru, što utječe na dodatni otpor na valovima, veća je u balastnom stanju nego u stanju punog opterećenja [12]. Obzirom da se oplakana površina po kojoj se integriraju tlakovi s ciljem određivanja sile dodatnog otpora na valovima značajnije mijenja u balastnom stanju, vrpčasta metoda nije prikladna za izračun dodatnog otpora. S druge strane, Rankineova panelna metoda daje prihvatljive rezultate osim u području visokih frekvencija gdje se potrebno uzeti u obzir odgovarajuću korekciju [12].

2. METODE ZA Približno ODREĐIVANJE POLOŽAJA TEŽIŠTA MASE BRODA I RADIJUSA TROMOSTI MASE

Značajke mase broda, odnosno položaj težišta mase broda i radijusi tromosti mase, utjecajni su parametri u proračunu dodatnog otpora broda na valovima. Ukoliko značajke nisu poznate, koriste se približne metode za njihovo određivanje.

2.1. Približno određivanje položaja težišta mase broda

Jedan od osnovnih parametara pri proračunu stabiliteta broda, ali i dodatnog otpora broda na valovima je udaljenost težišta broda od kobilice \overline{KG} . Položaj težišta mase broda između ostalog ovisi o rasporedu svih masa na brodu.

Udaljenost težišta broda od kobilice ovisi o [13]:

- vrsti broda,
- rasporedu tereta i teretnih prostora,
- vrsti pogonskog postrojenja,
- vrsti materijala (metal, drvo, plastika ...),
- veličini i rasporedu prostora za boravak,
- razmještanju brodske opreme za rukovanje teretom.

Položaj težišta mase broda po visini, prikazan na slici 4., moguće je odrediti kao:

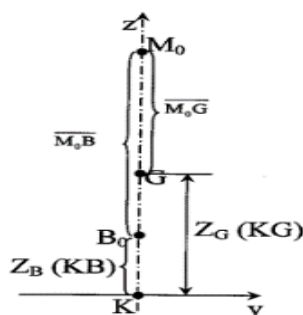
$$\overline{KG} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{GM} \quad (29)$$

gdje je:

\overline{KB} - udaljenost težišta volumena istisnine od kobilice,

\overline{BM} - poprečni metacentarski radijus,

\overline{GM} - poprečna metacentarska visina.



Slika 4. Prikaz težišta mase broda po visini [14]

Jedan od glavnih uzroka prevrtanja broda na valovima je gubitak stabiliteta pri ljuljanju broda. Stoga je važno što točnije procijeniti period ljuljanja T_{roll} koji je, pored ostalog, ovisan i o veličini početne metacentarske visine \overline{GM} .

Do prevrtanje broda može doći ukoliko promjena površine vodne linije uzrokuje značajnu promjenu metacentarske visine broda što ima za posljedicu promjenu u amplitudi ljuljanja broda. Brodovi s velikom početnom metacentarskom visinom imat će mali period ljuljanja. Za takve brodove kaže se da su “kruti brodovi” (eng. *stiff*), a period ljuljanja kod takvih brodova u određenim slučajevima, može biti manji od 8 sekunda. Brodovi s malom početnom metacentarskom visinom imat će veliki period ljuljanja i za njih se kaže da su “meki brodovi” (eng. *tender*), gdje period ljuljanja može trajati od 25 do 35 sekundi [15].

Period ljuljanja T_{roll} moguće je odrediti na temelju metacentarske visine pomoću sljedeće formule [16]:

$$T_{roll} = \frac{2\pi i_\varphi}{\sqrt{g\overline{GM}}} \quad (30)$$

gdje je:

i_φ - radijus tromosti mase broda koji uključuje i dodatnu masu oko osi x , $i_\varphi = k_\varphi B$,

k_φ - koeficijent koji ovisi o vrsti i veličini broda, $k_\varphi = 0,32 \div 0,45$.

Poprečna metacentarska visina \overline{GM} određuje se na temelju jednadžbe (29), gdje su \overline{KB} , \overline{BM} i \overline{KG} određeni na sljedeći način:

$$\text{Morrish} \quad \overline{KB}_1 = \frac{T(2,5 - C_{VP})}{3} \quad (31)$$

$$\text{Morrish} \quad \overline{KB}_2 = T - \frac{1}{3} \left(\frac{T}{2} + \frac{\nabla}{A_{WP}} \right) \quad (32)$$

$$\text{Normand I} \quad \overline{KB}_3 = T(0,9 - 0,36C_M) \quad (33)$$

$$\text{Schneekluth} \quad \overline{KB}_4 = T(0,9 - 0,3C_M - 0,1C_B) \quad (34)$$

gdje je:

T - gaz broda,

C_{VP} - vertikalni prizmatički koeficijent,

A_{WP} - površina vodne linije,

C_M - koeficijent punoće glavnog rebra,

C_B - koeficijent punoće istisnine.

Stoga se vertikalni položaj težišta volumena istisnine \overline{KB} određuje kao njihova srednja vrijednost:

$$\overline{KB} = \frac{\overline{KB_1} + \overline{KB_2} + \overline{KB_3} + \overline{KB_4}}{4} \quad (35)$$

Poprečni metacentarski radijus određen je na sljedeći način:

$$\overline{BM} = C_I \frac{B^2}{12TC_B} \quad (36)$$

gdje je:

B - širina broda,

C_I - koeficijent korekcije, Norman $C_{I,1} = 0,096 + 0,89C_{WP}^2$,

Schneekluth $C_{I,2} = C_{WP}^{1,8}$,

Bauer $C_{I,3} = 0,0372 \cdot (2C_{WP} + 1)^3$,

Dudszus – Danckwardt $C_{I,4,5} = 0,13C_{WP} + 0,87C_{WP}^2 \pm 0,005$,

C_{WP} - koeficijent punoće vodne linije, $C_{WP} = C_P^{2/3} + 0,05$.

Ukupni C_I određuje se kao srednja vrijednost:

$$C_I = \frac{C_{I,1} + C_{I,2} \dots C_{I,5}}{5} \quad (37)$$

Vertikalni položaj težišta mase broda moguće je odrediti na sljedeći način:

$$\overline{KG} = CD_S \quad (38)$$

gdje je:

D_S - visina broda s nadgrađem, $D_S = D + D_{SS}$,

C - iskustveni koeficijent, $C = 0,52 \div 0,54$ za tankere, $C = 0,58 \div 0,64$ za kontejnerske brodove.

2.1.1. Metoda 1

Metoda 1 omogućuje projektantu približno određivanje težišta mase broda u ranoj fazi osnivanja broda. U ovoj metodi metacentarska visina \overline{GM} određena je na dva načina – preko perioda ljuľanja T_{roll} i širine broda B kako bi se ustanovilo koji od dva navedena pristupa daje toćnije rezultate. Pojedini ćlanovi u jednadžbi (29) određuju se kako slijedi u nastavku [17].

Položaj težišta volumena istisnine određuje se na sljedećić način:

$$\overline{KB} = k_t T \quad (39)$$

gdje je k_t koeficijent za određivanje položaja težišta istisnine:

$$k_t = \frac{5}{6} - \frac{C_B}{3C_{wp}}, \quad C_{wp} = 0,33 + C_B. \quad (40)$$

Poprećni metacentarski radijus je odrećen prema slijedećić formuli:

$$\overline{BM} = k_{BM} \frac{B^2}{12T} \quad (41)$$

gdje je k_{BM} koeficijent za određivanje metacentarskog radijusa kako slijedi:

$$k_{BM} = \frac{0,096 + 0,89 C_{wp}^2}{C_B} \quad (42)$$

Poprećnu metacentarsku visinu moguće je procijeniti preko perioda ljuľanja na sljedećić način:

$$\overline{GM}_{period} = \left(\frac{2cB}{T_{roll}} \right)^2 \quad (43)$$

gdje je c koeficijent za određivanje metacentarske visine kako slijedi:

$$c = 0,373 + 0,023 \frac{B}{T} - 0,043 \frac{L_{pp}}{100} \quad (44)$$

Takoćer, poprećnu metacentarsku visinu moguće je procijeniti kao postotak širine broda kako slijedi:

$$\overline{GM}_{\% \text{ širine}} = 0,06B \div 0,092B \quad (45)$$

2.1.2. Metoda 2

Metoda 2 na dva različita načina određuje težište mase broda \overline{KG} [18].

2.1.2.1. Metoda 2 – I način

Prvi način ove metode se temelji na iskustvenim podacima za određeni tip broda izraženim preko koeficijenta C_{KG} . Izraz za određivanje \overline{KG} analogan je izrazu iz jednadžbe (38) :

$$\overline{KG} = C_{KG} D_A \quad (46)$$

2.1.2.2. Metoda 2 – II način

Drugi način se svodi na određivanje \overline{KG} iz jednadžbe (29) tako da se svaka komponenta računa posebno osim \overline{GM} koji je dan na temelju iskustvenih podataka:

$$\overline{KG} = \overline{KM} - \overline{GM} \quad (47)$$

gdje je \overline{KM} udaljenost metacentra od kobilice:

$$\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM} \cong T(0,9 - 0,3C_M - 0,1C_B) + \frac{(3C_{WP} - 1)B^2}{24C_B T} \quad (48)$$

a C_{WP} se računa prema sljedećem izrazu:

$$C_{WP} = \frac{1}{3} \left(\frac{1 + 2C_B}{\sqrt{C_M}} \right) \quad (49)$$

Poprečna metacentarska visina je dana u određenom rasponu za pojedini tip broda, $\overline{GM} = 1 \div 6$ m za tankere, $\overline{GM} = 0,5 \div 1,5$ m za kontejnerske brodove.

2.1.3. Metoda 3

Metoda 3 određuje \overline{KG} na sličan način kao i Metoda 1, odnosno na temelju jednadžbe (29) pri čemu su \overline{KB} i \overline{BM} određeni na isti način kao i u Metodi 1. Razlikuje se jedino to što je metacentarska visina \overline{GM} , izražena preko perioda ljuljanja, dana u drugačijoj formulaciji nego što je to u Metodi 1 [19]:

$$T_{roll} = \frac{2\pi k}{\sqrt{g \overline{GM}}} \rightarrow \overline{GM} = \frac{4\pi^2 k^2}{T_{roll}^2 g} \quad (50)$$

gdje je k radijus tromosti mase oko osi x , $k = (0,35 \div 0,45)B$.

2.1.4. Metoda 4

Metoda 4 analogna je Metodi 1. Razlikuje se jedino izraz za određivanje metacentarske visine \overline{GM} na temelju perioda ljuľjanja broda T_{roll} u mjernim stopama [20]:

$$T_{roll} = \frac{0,44B}{\sqrt{\overline{GM}}} \rightarrow \overline{GM} = \frac{0,44^2 B^2}{T_{roll}^2} \quad (51)$$

2.1.5. Metoda 5

Metoda 5 temelji se na približnom određivanju težišta mase broda \overline{KG} u ovisnosti o visini broda D [21]:

$$\overline{KG} = (0,63 \div 0,70)D \quad (52)$$

2.1.6. Metoda 6

Metoda 6 omogućuje određivanje težišta mase broda u preliminarnoj fazi projektiranja uz zadovoljavajuću točnost. U ovoj metodi \overline{GM} je određen na dva načina – pomoću iskustvenih podataka ovisno o tipu broda te pomoću širine broda iz jednadžbe (45) kako bi se utvrdilo koji od dva navedena pristupa daje bolje rezultate za \overline{KG} .

Pojedine komponente u jednadžbi (29) određuju se na sljedeći način [13]:

$$\overline{KB}_1 = \frac{T}{1 + \frac{C_B}{C_{WP}}} \quad (53)$$

gdje je:

$$C_{WP} = C_B + K \quad (54)$$

$$K = \frac{1 - C_B}{3} \quad (55)$$

$$\overline{KB}_2 = 0,535T \quad (56)$$

Stoga je konačna vrijednost \overline{KB} određena kao srednja vrijednost:

$$\overline{KB} = \frac{\overline{KB}_1 + \overline{KB}_2}{2} \quad (57)$$

Poprečni metacentarski radijus određuje se prema jednadžbi:

$$\overline{BM}_T = \frac{\eta B^2}{T C_B} \quad (58)$$

gdje je η koeficijent koji uzima u obzir promjenu vodne linije, $\eta = 0,084(C_w)^2$.

Poprečna metacentarska visina \overline{GM} je dana na temelju iskustvenih podataka za pojedini tip broda, $\overline{GM} \approx 1,5$ m za kontejnerske brodove te $\overline{GM} = 0,3$ m ÷ 1 m za tankere.

2.1.7. Metoda 7

Metoda 7 omogućuje više načina određivanja težišta volumena istisnine \overline{KB} te koeficijenta $C_I = f(C_{WP})$ za određivanje poprečnog metacentarskog radijusa \overline{BM}_T , što u konačnici vodi do preciznijeg određivanja težišta mase broda \overline{KG} .

Pojedine komponente u jednadžbi (29) se određuju na način opisan u nastavku.

Autori Schneekluth i Bertram predstavljaju tri regresijske jednadžbe pripisane Normandu, Schneekluthu i Wobigu za određivanje \overline{KB} [22]:

$$\overline{KB}_1 = (0,90 - 0,36C_M)T \quad (59)$$

$$\overline{KB}_2 = (0,90 - 0,30C_M - 0,10C_B)T \quad (60)$$

$$\overline{KB}_3 = (0,78 - 0,285C_{VP})T \quad (61)$$

gdje je $C_{VP} = \frac{\nabla}{C_{WP}LBT} = \frac{C_B}{C_{WP}}$.

Konačna vrijednost \overline{KB} je određena kao srednja vrijednost:

$$\overline{KB} = \frac{\overline{KB}_1 + \overline{KB}_2 + \overline{KB}_3}{3} \quad (62)$$

Poprečni metacentarski radijus određuje se na sljedeći način:

$$\overline{BM}_T = \frac{I_T}{\nabla} \quad (63)$$

gdje je:

I_T - moment tromosti površine vodne linije u poprečnom smjeru:

$$I_T = C_I LB^3 \quad (64)$$

C_I - koeficijent određen prema različitim autorima:

$$\text{D'Arcangelo } C_{I,1} = 0,1216C_{WP} - 0,0410 \quad (65)$$

$$\text{Normand } C_{I,2} = \frac{0,096 + 0,89C_{WP}^2}{12} \quad (66)$$

$$\text{Bauer } C_{I,3} = \frac{0,0372(2C_{WP} + 1)^3}{12} \quad (67)$$

$$\text{McCloghrie } C_{I,4} = \frac{1,04C_{WP}^2}{12} \quad (68)$$

$$\text{Dudszus and Danckwardt } C_{I,5} = \frac{0,13C_{WP} + 0,87C_{WP}^2}{12} \quad (69)$$

Ukupni koeficijent C_I određen je kao srednja vrijednost:

$$C_I = \frac{C_{I,1} + C_{I,2} + \dots + C_{I,7}}{7} \quad (70)$$

Koeficijent punoće vodne linije C_{WP} za tankere i brodove za rasuti teret određuje se prema sljedećim izrazima:

$$C_{WP,1} = \frac{C_B}{0,471 + 0,551C_B} \quad (71)$$

$$\text{Schneekluth 1 } C_{WP,2} = \sqrt[3]{C_P^2} \quad (72)$$

$$\text{Schneekluth 2 } C_{WP,3} = \frac{1 + 2 \frac{C_B}{\sqrt{C_M}}}{3} \quad (73)$$

$$\text{Average hulls, } C_{WP,4} = \frac{1 + 2C_B}{3} \quad (74)$$

Konačni izraz za koeficijent punoće vodne linije glasi:

$$C_{WP} = \frac{C_{WP,1} + C_{WP,2} + C_{WP,3} + C_{WP,4}}{4} \quad (75)$$

Metacentarska visina \overline{GM} određuje se iz jednadžbe za period ljuľanja broda T_{roll} na sljedeći naćin:

$$T_{roll} = \frac{2,007r_{xx}}{\sqrt{GM}} \rightarrow \overline{GM} = \frac{2,007^2 r_{xx}^2}{T_{\phi}^2} \quad (76)$$

gdje je r_{xx} radijus tromosti mase oko osi x :

$$r_{xx} = 0,50\kappa B \quad (77)$$

$$\kappa \cong 0,4B \quad (78)$$

2.2. Rezultati metoda za približno određivanje položaja težišta mase broda

Stvarne vrijednosti položaja težišta mase broda po visini dane su u tablici 1. za tri različita broda: dva kontejnerska broda KCS i S175 te tanker KVLCC2, dok su u tablicama 3.-10. prikazani rezultati približno određenog položaja težišta mase na temelju prethodno objašnjenih metoda. Većina navedenih metoda temelji se na periodu ljuljanja pa je njegovo određivanje od ključne važnosti. Odnosno, što je točnije određen period ljuljanja preciznija je procjena položaja težišta mase broda po visini \overline{KG} .

U tablici 2. prikazane su izračunate vrijednosti perioda ljuljanja za brodove KCS, S175 te KVLCC2. U usporedbi s iskustvenim približnim podacima perioda ljuljanja za određeni tip broda, izračun perioda ljuljanja za svaki brod posebno pokazao se učinkovitijim. Za slučaj tankera KVLCC2 predloženi period ljuljanja za tankere je oko 20s, dok je izračunata vrijednost 18,93 s. Za kontejnerske brodove predloženi period ljuljanja je od 12 do 20 s, dok je izračunata vrijednosti 11,92 s za kontejnerski brod KCS te 18,87 s za kontejnerski brod S175. Dakle, period ljuljanja potrebno je što preciznije odrediti, jer kriva procjena može dovesti do netočno određenog položaja težišta mase broda.

Potrebno je naglasiti važnosti utjecaja radijusa tromosti mase i_ϕ odnosno koeficijenta k u jednadžbi (30) za približno određivanje perioda ljuljanja. Naime, koeficijent k je definiran rasponom vrijednosti unutar kojega projektant proizvoljno odabire vrijednost ovisno o tipu broda. Kao glavni nedostatak moguće je izdvojiti široki raspon za određivanje koeficijenta k što projektantu daje određenu nesigurnost prilikom njegovog određivanja.

Tablica 1. Stvarne vrijednosti položaja težišta mase broda za tri različita broda

Brod	\overline{KG} (m)
KCS	7,28
S175	9,55
KVLCC2	18,6

Tablica 2. Period ljuljanja za brodove KCS, KVLCC2 i S175

Brod	KB (m)	BM (m)	\overline{KG} (m)	GM (m)	T_{roll} (s)
KCS	6,090	8,252	12,470	1,871	11,92
S175	5,488	5,641	10,382	0,747	18,87
KVLCC2	11,196	11,023	17,550	1,468	18,93

Tablica 3. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 1

Brod	KB (m)	BM (m)	GM_{period} (m)	$GM\%širine$ (m)	KG_{period} (m)	$KG\%širine$ (m)
KCS	5,916	7,492	3,428	2,962	9,980	10,445
S175	5,363	5,361	0,935	1,524	9,789	9,200
KVLCC2	10,838	12,667	3,369	5,336	20,136	18,170

Tablica 4. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 2 – I način

Brod	KG (m)
KCS	12,470
S175	10,382
KVLCC2	17,550

Tablica 5. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 2 – II način

Brod	KM (m)	GM (m)	KG (m)
KCS	13,888	0,5	13,388
S175	10,933	0,5	10,433
KVLCC2	24,299	5,5	18,799

Tablica 6. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 3

Brod	KB (m)	BM (m)	GM (m)	KG (m)
KCS	5,916	7,492	3,599	9,809
S175	5,363	5,361	1,167	9,557
KVLCC2	10,838	12,667	4,629	18,876

Tablica 7. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 4

Brod	KB (m)	BM (m)	GM (m)	KG (m)
KCS	5,916	7,492	4,635	8,773
S175	5,363	5,361	1,151	9,573
KVLCC2	10,838	12,667	5,963	17,543

Tablica 8. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 5

Brod	KG (m)
KCS	11,970
S175	9,702
KVLCC2	18,900

Tablica 9. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 6

Brod	<i>KB</i> (m)	<i>BM</i> (m)	<i>GM</i> (m)	<i>GM</i> %širine (m)	<i>KG</i> (m)	<i>KG</i> %širine (m)
KCS	5,811	7,293	1,5	2,962	11,604	10,142
S175	5,182	5,092	1,5	1,524	8,774	8,750
KVLCC2	10,960	12,792	1,0	5,336	22,751	18,415

Tablica 10. Rezultati položaja težišta mase dobiveni metodom 7

Brod	<i>KB</i> (m)	<i>BM</i> (m)	<i>GM</i> (m)	<i>KG</i> (m)
KCS	5,847	7,702	4,703	8,846
S175	5,221	5,452	1,168	9,506
KVLCC2	10,931	13,244	6,050	18,124

Iako su vidljiva stanovitna odstupanja u rezultatima dobivenim pojedinim metodama, moguće je zaključiti da su sve navedene metode za približno određivanje položaja težišta mase broda relativno pouzdane te omogućuju brzu procjenu \overline{KG} već u ranoj fazi osnivanja broda.

2.3. Približno određivanje radijusa tromosti mase broda

Kada brodovi ne prenose teret masa je koncentrirana na krajevima broda (strojarnica na krmi i balast vode na pramcu), dok je u slučaju potpuno opterećenog broda masa koncentrirana oko sredine broda [2]. Za svako stanje krcanja broda važno je već u preliminarnoj analizi što točnije procijeniti radijuse tromosti mase broda. Iako postoji više načina određivanja radijusa tromosti mase, u radu su prikazane metode koje se najčešće koriste.

2.3.1. Metoda 1

Radijusi tromosti mase broda općenito se u okviru preliminarne procjene određuju na temelju glavnih dimenzija broda, odnosno pomoću širine broda za određivanje r_{xx} i duljine broda za r_{yy} i r_{zz} [2].

Kako je duljina broda znatno veća od njegove širine, očekivano je da će radijus tromosti mase broda oko osi y odnosno z osi biti znatno veći nego oko osi x te samim time imati i veći utjecaj.

Radijuse tromosti mase broda moguće je približno odrediti na sljedeći način:

$$r_{xx} = 0,3B \div 0,4B \approx 0,35B \quad (79)$$

$$r_{yy} = 0,22L \div 0,28L \approx 0,25L \quad (80)$$

$$r_{zz} = 0,22L \div 0,28L \approx 0,25L \quad (81)$$

gdje je:

r_{xx} - radijus tromosti mase oko osi x ,

r_{yy} - radijus tromosti mase oko osi y ,

r_{zz} - radijus tromosti mase oko osi z .

2.3.2. Metoda 2

Metoda omogućuje približno određivanje r_{yy} na temelju duljine broda kao i u prethodnoj metodi, ali je dan uži raspon što omogućuje precizniju procjenu radijusa tromosti mase [23]:

$$r_{yy} = 0,24L \div 0,26L \approx 0,25L \quad (82)$$

gdje je L duljina broda.

2.3.3. Metoda 3

Radijus tromosti mase oko osi x određuje se pomoću perioda ljuľanja T_{roll} i metacentarske visine \overline{GM} kako slijedi [24]:

$$r_{xx} = \frac{T_{roll} \sqrt{\overline{GM}}}{2} \quad (83)$$

$$T_{roll} = 0,4B \quad (84)$$

$$\overline{GM} = 0,07B \quad (85)$$

2.3.4. Metoda 4

Metodom 4 radijus tromosti mase oko osi x određuje se na temelju širine broda B i visine D kako slijedi [25]:

$$r_{xx} = 0,30\sqrt{B^2 + D^2} . \quad (86)$$

2.3.5. Metoda 5

Metoda 5 temelji se na empirijskoj formuli za približno određivanje radijusa tromosti mase broda r_{xx} pomoću širine B i koeficijenta κ koji ovisi o glavnim karakteristikama broda.

Radijus tromosti mase oko osi x određuje se kao:

$$r_{xx} = 0,50\kappa B \quad (87)$$

gdje je:

$$\kappa = 0,724 \cdot \sqrt{C_B (C_B + 0,2) - 1,1(C_B + 0,2)(1,0 - C_B) \left(2,2 - \frac{D}{T}\right) + \left(\frac{D}{B}\right)^2} \quad (88)$$

Radijus tromosti mase oko osi y definiran je rasponom prema jednadžbi (82) [22]:

$$r_{yy} = 0,24L \div 0,26L \approx 0,25L \quad (89)$$

2.4. Rezultati metoda za približno određivanje radijusa tromosti mase broda

U tablici 11. prikazane su stvarne vrijednosti radijusa tromosti mase za pojedini tip broda dok su u tablicama 12.-16. prikazane vrijednosti dobivene pomoću prethodno navedenih metoda. Radijusi tromosti mase oko osi y i z imaju približno iste vrijednosti budući da ovise o istom parametru odnosno o duljini broda. Vidljiva su određena odstupanja između rezultata dobivenih pojedinim metodama za približno određivanje radijusa tromosti mase broda. Obzirom da se radi o približnim metodama moguće je zaključiti da navedene metode pružaju zadovoljavajuću točnost u početnoj procjeni radijusa tromosti mase broda.

Tablica 11. Stvarne vrijednosti radijusa tromosti mase za tri različita broda

Brod	r_{xx} (m)	r_{yy} (m)	r_{zz} (m)
KCS	12,88	57,50	57,50
S175	8,331	42,00	42,00
KVLCC2	23,20	80,00	80,00

Tablica 12. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 1

Brod	r_{xx} (m)	r_{yy} (m)	r_{zz} (m)
KCS	11,270	58,125	58,125
S175	8,890	44,562	44,562
KVLCC2	20,300	81,375	81,375

Tablica 13. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 2

Brod	r_{yy} (m)
KCS	58,125
S175	44,562
KVLCC2	81,375

Tablica 14. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 3

Brod	r_{xx} (m)
KCS	9,669
S175	8,911
KVLCC2	23,373

Tablica 15. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 4

Brod	r_{xx} (m)
KCS	11,216
S175	8,911
KVLCC2	19,590

Tablica 16. Rezultati radijusa tromosti mase dobiveni metodom 5

Brod	r_{xx} (m)	r_{yy} (m)
KCS	10,144	58,125
S175	7,087	44,562
KVLCC2	20,195	81,375

3. PRINCIP RADA PROGRAMSKOG PAKETA HYDROSTAR

Za proračun gibanja broda te dodatnog otpora broda na harmonijskim valovima, odnosno određivanje potencijala brzine kod radijacijsko-difrakcijskog modela u frekvencijskoj domeni, korišten je programski paket HydroSTAR tvrtke Bureau Veritas [6].

Prilikom rješavanja problema difrakcije i radijacije u slučaju postojanja brzine napredovanja broda, jedinstveni rubni uvjet na slobodnoj površini znatno otežava rješavanje odgovarajuće Greenove funkcije. Iz tog razloga programski paket HydroSTAR uzima u obzir brzinu broda kroz susretnu frekvenciju nailaznih valova. Na taj se način utjecaj brzine broda, uz primjenu uvjeta nepromočivosti na oplakanoj površini, uzima u obzir kroz promjenu frekvencije nailaznog vala [26].

Programski paket koristi metodu rubnih integralnih jednadžbi (eng. *Boundary Integral Equation*, BIE), utemeljenu na Greenovom integralnom teoremu odnosno na određivanju jednadžbe površinskog integrala i njenom rješavanju na rubnim površinama domene [6]. Obično je, ovisno o izboru Greenove funkcije, potrebno diskretizirati samo oplakanu površinu trupa broda. Samo u iznimnim slučajevima diskretizira se i slobodna površina.

Hidrodinamički model temelji se na linearnoj teoriji potencijalnog strujanja te omogućuje izračun gibanja i sila prvog i drugog reda na temelju karakteristika modela i ulaznih parametara valova. Spomenuti radijacijsko-difrakcijski problem graničnih vrijednosti rješava se metodom rubnih integralnih jednadžbi.

Budući da se programski paket HydroSTAR temelji na teoriji potencijalnog strujanja, kako bi se izbjegli nefizikalni rezonantni odzivi broda dodana je fiktivna sila u momentnim jednadžbama dinamičke ravnoteže. Na taj način se u obzir uzima disipacija energije i prigušenje uslijed viskoznosti fluida.

3.1. Sile zanošenja i kvadratna prijenosna funkcija QTF

Dodatni otpor broda na valovima uslijed hidrodinamičkih opterećenja i interakcije između valnog sustava uzrokovanog gibanjima broda i nailaznog valnog polja prvog reda određuje se pomoću potencijala brzine strujanja nailaznog vala u dubokoj vodi na temelju na Bernoullijeve jednadžbe. Na taj način je moguće izraziti srednju vrijednost tlaka drugog reda čijom se integracijom duž trupa broda određuju sile i momenti drugog reda (Near-field metoda) [27].

Potencijal brzine strujanja nailaznog vala u dubokoj vodi dan je sljedećom jednačbom:

$$\Phi_w(x, z; t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (90)$$

Nelinearizirana Bernoullijeva jednačba glasi:

$$\frac{p(x, z; t)}{\rho} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \nabla \Phi_w \cdot \nabla \Phi_w - gz \quad (91)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} \nabla \Phi_w \cdot \nabla \Phi_w &= \Phi_x^2 + \Phi_z^2 = (\omega \zeta_a e^{kz})^2 \cos^2(kx - \omega t) + (\omega \zeta_a e^{kz})^2 \sin^2(kx - \omega t) = \\ &= (\omega \zeta_a e^{kz})^2 \end{aligned} \quad (92)$$

Slijedi da je tlak moguće izraziti na sljedeći način:

$$p(x, z; t) = \rho \zeta_a^2 (\omega e^{kz})^2 \quad (93)$$

Dodatni otpor broda na valovima određen je na temelju sile zanošenja kao opterećenja drugog reda uslijed nailaznih valova na trup broda, preko kvadratne prijenosne funkcije QTF. Numeričko rješenje gibanja i opterećenja uslijed sila zanošenja zahtjeva poznavanje valnih opterećenja drugog reda pri različitim frekvencijama nailaznih valova. Niskofrekventna valna opterećenja mogu se opisati pomoću kvadratne prijenosne funkcije nailaznih valova i difrakcijskih odnosno radijacijskih valnih polja. Kako bi se odredila QTF nužno je riješiti problem valnih opterećenja drugog reda.

Niskofrekventna valna opterećenja drugog reda određuju se na svim frekvencijama jednakim razlici dviju valnih frekvencija u svim mogućim kombinacijama na određenom stanju mora. Proporcionalna su produktima valnih amplituda i sastoje se od dva dijela - jedan dio ovisan je o kvadratnim produktima valnog polja prvog reda, a drugi dio o nailaznim i difrakcijskim potencijalima drugog reda koje je moguće odrediti na temelju Froude-Krylovljeve sile drugog reda te Haskindovog integrala na površini tijela kako slijedi [28]:

$$F(\omega_i, \omega_j) = F_q(\omega_i, \omega_j) + F_p(\omega_i, \omega_j) \quad (94)$$

gdje je:

$F_q(\omega_i, \omega_j)$ - opterećenje prvog reda,

$F_p(\omega_i, \omega_j)$ - opterećenje drugog reda,

ω_i, ω_j - frekvencije nailaznog vala.

Dok je prvi dio moguće odrediti rješenjem valne difrakcije i radijacije prvog reda, drugi dio valnih opterećenja drugog reda sporo konvergira i uključuje gradijente potencijala brzine [28]. Haskindov integral omogućuje eliminaciju nepoznate funkcije potencijala difrakcije zamjenom potencijalom radijacije [2] kako slijedi:

$$\iint_S \phi_7 \frac{\partial \phi_k}{\partial n} dS = - \iint_S \phi_k \frac{\partial \phi_0}{\partial n} dS, k = 1 \dots 6 \quad (95)$$

gdje je:

ϕ_7 - kompleksni potencijal valova difrakcije,

ϕ_k - kompleksni potencijal valova radijacije,

ϕ_0 - kompleksni potencijal nailaznog vala.

Obzirom da je QTF pretpostavljena kao pravilna funkcija frekvencija nailaznih valova ω_i i ω_j moguće je uzimajući u obzir izraz $\Delta\omega = \omega_i - \omega_j$ razviti QTF u Taylorov red kako slijedi:

$$F(\omega_i, \omega_j) = F_0(\omega_i) + F_1(\omega_i)\Delta\omega + F_2(\omega_i)(\Delta\omega)^2/2 + \dots \quad (96)$$

Komponenta $F_1(\omega_i)$ sastoji se od četiri dijela:

$$F_1(\omega_i) = F_q^1 + F_{p1}^1 + F_{p2}^1 + F_{p3}^1 \quad (97)$$

gdje je:

F_q^1 - doprinos valnog opterećenja prvog reda,

F_{p1}^1 - doprinos valnog opterećenja drugog reda i valova difrakcije,

F_{p2}^1 - korekcija drugog reda rubnih uvjeta na trupu,

F_{p3}^1 - utjecaj tlaka duž slobodne površine.

Komponentu $F_2(\omega_i)$ je moguće odrediti kao razliku ukupne QTF u valnom polju bikromatskih valova te nulte komponente $F_0(\omega_i)$ i prve komponente $F_1(\omega_i)$ kako slijedi:

$$F_2(\omega_i) = \frac{2 \left[F\left(\omega_i + \frac{\Delta\omega}{2}, \omega_i - \frac{\Delta\omega}{2}\right) - F_0(\omega_i) - F_1(\omega_i)\Delta\omega \right]}{\Delta\omega^2} \quad (98)$$

Kvadratna prijenosna funkcija QTF, koja predstavlja niskofrekventna valna opterećenja, u radu je aproksimirana samo članom nultog reda $F_0(\omega_i)$ ili silom zanošenja koja je konstantna pri određenoj frekvenciji nailaznog vala. To je tzv. Newmanova aproksimacija koja znatno pojednostavljuje izračun dodatnog otpora broda na valovima.

Član prvog reda linearno je proporcionalan razlici frekvencija $\omega_i - \omega_j$, a član drugog reda proporcionalan je kvadratu razlike frekvencija.

Kao što je već spomenuto, za određivanje dodatnog otpora broda na valovima važno je odrediti nulti član, koji je ovisan o frekvenciji nailaznog vala kao srednjoj vrijednosti dviju frekvencija $(\omega_1 + \omega_2)/2$, odnosno uzimaju se u obzir samo dijagonalni članovi u matrici kvadratne prijenosne funkcije.

Slijedi da se dodatni otpor broda na valovima može odrediti direktnom integracijom tlaka po oplakanoj površini duž trupa broda na sljedeći način:

$$F_0(\omega_i) = \frac{\rho}{2} \int_S \left[(\nabla \phi \cdot \nabla \phi^*) \vec{n} - \phi_n^* \nabla \phi - \phi_n \nabla \phi^* \right] dS - \frac{\rho \omega_i^2}{2g} \oint_L (\phi \phi^*) \vec{n} dL \quad (99)$$

gdje je:

ϕ - potencijal brzine prvog reda,

ϕ_n - derivacija potencijala brzine prvog reda,

ϕ^* - konjugirano kompleksni potencijal brzine prvog reda,

ϕ_n^* - konjugirano kompleksna derivacija potencijala brzine prvog reda.

Konačno, dodatni otpor na valovima u bezdimenzijskom obliku može se izraziti preko koeficijenta dodatnog otpora:

$$C_{AW} = \frac{R_{AW}}{\rho g \zeta_a^2 B^2 / L} \quad (100)$$

3.2. Prijenosna funkcija

Odziv broda na pravilnim valovima moguće je prikazati u bezdimenzijskom obliku, pomoću prijenosnih funkcija (eng. *transfer function*) određenih na temelju omjera amplitude gibanja broda i valova, odnosno operatorima amplitude odziva *RAO* (eng. *response amplitude operator*).

Prijenosne funkcije za određeni raspon frekvencija nailaznih harmonijskih valova prikazuju bezdimenzijske amplitude odziva gibanja, brzine i ubrzanja tijela na valovima.

Operator amplitude odziva definira se na sljedeći način:

$$RAO = \left| \frac{\eta_a}{\zeta_a} \right|^2 = H_{Ra}^2 \quad (101)$$

gdje je η_a amplituda odziva, a H_{Ra} prijenosna funkcija.

RAO je u bezdimenzijskom obliku za slučaj svih translacijskih gibanja, a za slučaj rotacijskih gibanja tijela njezina bezdimenzionalnost postiže se dijeljenjem amplitude odziva dodatno s valnim brojem k prema sljedećem izrazu [2]:

$$RAO = \left| \frac{\eta_a}{k\zeta_a} \right|^2 \quad (102)$$

Odziv broda definiran je harmonijskim funkcijama te ovisi o amplitudama i faznim pomacima koji se određuju zasebno za različite frekvencije i smjerove nailaznih valova. Prijenosne funkcije njihanja broda potrebno je odrediti za svaku pojedinu brzinu broda i susretni kut broda i valova.

Važno je naglasiti da kod poniranja, posrtanja i ljuljanja može doći do rezonancije, jer su ta gibanja izložena povratnim silama te imaju vlastitu frekvenciju koja može biti približno jednaka valnoj frekvenciji [29]. Iz tog razloga navedena gibanja je potrebno što točnije odrediti.

3.3. Susretna frekvencija

Brod koji plovi određenom brzinom susreće valove pri različitim frekvencijama ovisno o brzini i relativnom smjeru nailaska na valove. Kut pod kojim valovi nailaze na brod naziva se susretni kut β i definira se kao kut koji zatvara vektor brzine broda s vektorom brzine vala. Ako brod plovi u smjeru napredovanja valova, susretni period će biti veći od perioda valova, odnosno susretna frekvencija biti će manja od frekvencije valova. Ako valovi nailaze na bok broda, neće biti razlike između valne i susretne frekvencije [2].

Susretna frekvencija vrlo je bitna kod određivanja gibanja broda te se može izraziti kao:

$$\omega_e = \omega - kU \cos \beta \quad (103)$$

Primjenom disperzivne jednadžbe za duboku vodu

$$\omega = \sqrt{kg} \quad (104)$$

slijedi:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} U \cos \beta = \omega \left(1 - \frac{\omega}{g} U \cos \beta \right) \quad (105)$$

pri čemu je vidljivo da susretna frekvencija ovisi o frekvenciji vala, brzini napredovanja broda i smjeru nailaska valova.

Kod valova u pramac, kada je $\beta = 180^\circ$, susretna frekvencija se može izraziti kao:

$$\omega_e = \omega + U \frac{\omega^2}{g} \quad (106)$$

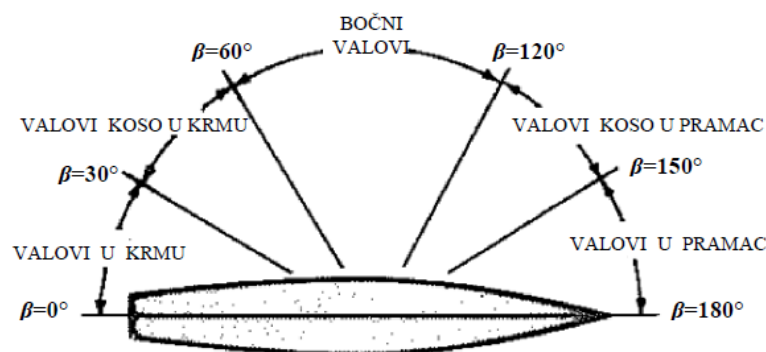
te se može zaključiti kako će brod, obzirom da je period obrnuto proporcionalan frekvenciji, brže susretati nailazne valove.

Kod valova u krmu broda, kada je $\beta = 0^\circ$, susretna frekvencija se može izraziti na sljedeći način:

$$\omega_e = \omega - U \frac{\omega^2}{g} \quad (107)$$

U tom će slučaju period susretanja valova biti duži.

Na slici 5. je prikazan način definiranja susretnih kutova te se može vidjeti da za valove u pramčani dio broda ($\beta = 90^\circ \div 270^\circ$) $\cos \beta$ u izrazu za susretnu frekvenciju (103) poprima negativne vrijednosti. To znači da će susretna frekvencija kod nailaska valova u pramac uvijek biti veća od susretne frekvencije kod nailaska valova u krmu.



Slika 5. Susretni kutovi broda i valova [29]

3.4. Iregularne frekvencije

Iregularne frekvencije su karakteristična pojava kod visokih susretnih frekvencija. Kao što je spomenuto u poglavlju 1.7.1 iregularne frekvencije se nastoje izbjeći ili ako to nije moguće, premjestiti u viši frekvencijski raspon. Postoji više metoda kako to postići. Jedna od njih je metoda koja koristi modificirane rubne integralne jednadžbe, ali se pojavljuju određene poteškoće pri proračunu. Metoda koristi modificiranu Greenovu funkciju dodaje dodatne izvore ili dipole na unutarnju slobodnu površinu trupa broda [30].

Najčešće korištena, proširena BIE metoda, primjenjuje Neumannov rubni uvjet (eng. *rigid lid condition*) na unutarnjoj slobodnoj površini trupa broda [6]. U tom slučaju, uveden je dodatni rubni uvjet bez mijenjanja ili dodavanja parametara u postojećoj formulaciji. Unutarnja slobodna površina diskretizira se panelima, finijom ili grubom mrežom u odnosu na trup broda, kako bi se izbjegnule iregularne frekvencije u promatranom frekvencijskom rasponu. Broj panela na unutarnjoj slobodnoj površini definiran je na temelju najniže iregularne frekvencije koja se može približno odrediti prema slijedećem izrazu:

$$\omega_{irr} \approx \sqrt{g \left(\frac{\pi / B}{\tanh(\pi T / B)} \right)} \quad (108)$$

Proširena BIE metoda koristi Greenov teorem i postavlja linearni sustav jednadžbi s manje nepoznanica u odnosu na standardnu BIE metodu. Navedena metoda ne eliminira u potpunosti iregularne frekvencije već ih premješta u područje viših frekvencija.

4. PRIPREMA PODATAKA ZA HYDROSTAR

Proračun dodatnog otpora na pravilnim valovima proveden je za tri različita broda, dva kontejnerska broda KCS i S175 te tanker KVLCC2. Razmatrana su dva stanja opterećenja broda: stanje punog opterećenja za sva tri broda te balastno stanje za KCS i KVLCC2. Inducirani su pravilni valovi u pramac ($\beta = 180^\circ$), valovi koso u pramac ($\beta = 150^\circ$) te bočni valovi ($\beta = 90^\circ; 120^\circ$) jedinične valne amplitude različitih omjera valne duljine i duljine broda λ / L .

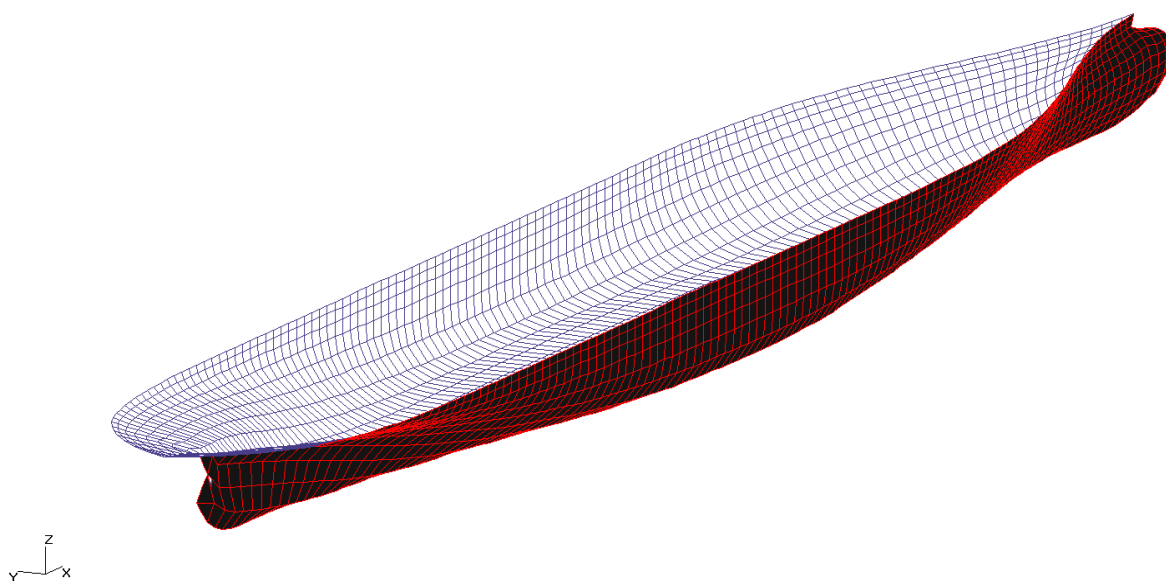
4.1. Definiranje ulaznih podataka za stanje punog opterećenja

Karakteristike trupa broda i parametri valova nužni su ulazni podaci za proračun dodatnog otpora u programskom paketu HydroSTAR. Prvenstveno je potrebno generirati formu na način da se unesu koordinate točaka rebara, gaz te trim broda. Također su dani podaci o masi, položaju težišta broda te radijusima tromosti mase oko osi koje prolaze kroz težište za sva tri broda kao što je prikazano u tablicama 17.-19. Nakon što je forma definirana, generira se mreža panela do vodne linije pomoću AMG alata (eng. *Automatic Mesh Generator*) koji se nalazi unutar HydroSTAR-a. AMG se temelji na adaptivnom kosinusnom pravilu i koristi točke koje opisuju trup broda. Pramčani i krmeni dio broda potrebno je posebno opisati točkama pramčane i krmene statve.

Tablica 17. Osnovne značajke kontejnerskog broda KCS

Duljina između okomica	L_{PP} (m)	230
Duljina vodne linije	L_{WL} (m)	232,5
Širina vodne linije	B_{WL} (m)	32,2
Visina	D (m)	19
Gaz	T (m)	10,8
Volumen istisnine	∇ (m ³)	52030
Masa istisnine	Δ (t)	53376016,1
Oplakana površina	S (m ²)	9424
Koeficijent punoće istisnine	C_B	0,6505
Koeficijent glavnog rebra	C_M	0,9849
Uzdužni položaj težišta istisnine	LCB (% L_{PP})	-1,48
Metacentarska visina	GM (m)	5,71
Bezdimenzijski radijus tromosti mase oko osi x	k_{xx}/B	0,40
Bezdimenzijski radijus tromosti mase oko osi y i z	$k_{yy}/L_{PP}, k_{zz}/L_{PP}$	0,25
Brzina	V (čv)	24
Froudeov broj	Fr	0,26

Površina trupa broda diskretizirana je mrežom kvadrilateralnih elemenata odnosno panela. Kao što je već spomenuto u poglavlju 1.7.1, duljina panela mora biti 20% ili manja od najmanje valne duljine. S druge strane, gusta mreža s velikim brojem panela povećava vrijeme trajanja proračuna. Sukladno tome, potrebno je pronaći optimalni broj panela za opisivanje trupa broda i unutarnje slobodne površine kako bi se izbjegle iregularne frekvencije i ostvarili što točniji rezultati dodatnog otpora broda na valovima.

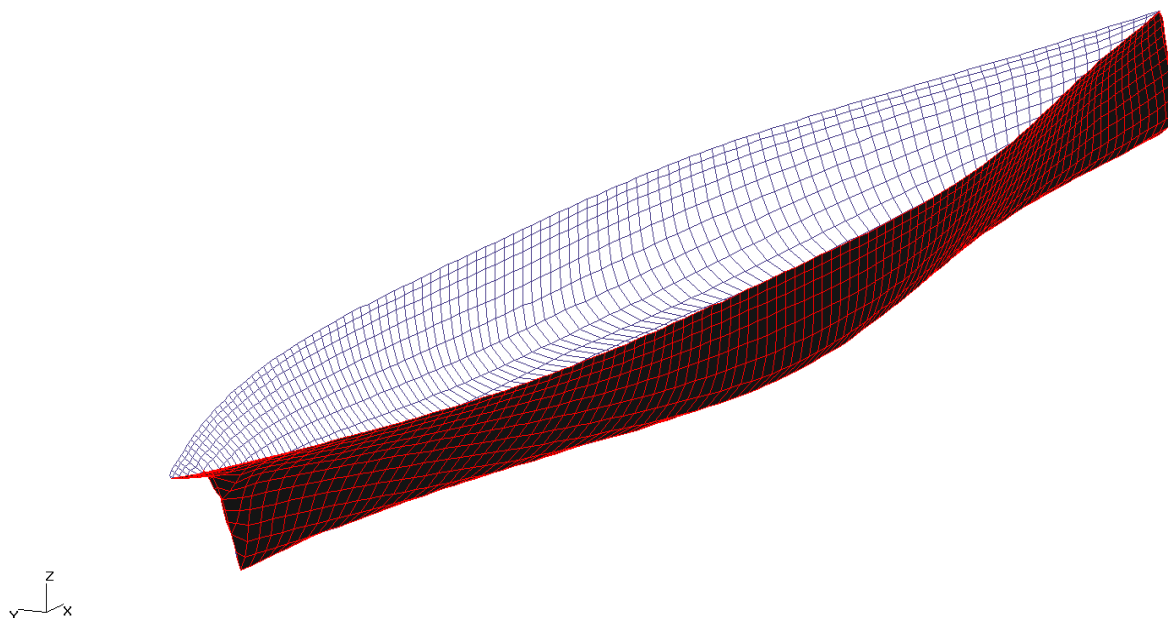


Slika 6. Panelni model kontejnerskog broda KCS za stanje punog opterećenja

Na slici 6. prikazan je panelni model kontejnerskog broda KCS za stanje punog opterećenja diskretiziran kvadrilateralnim panelima. Broj panela na površini trupa broda je 1396, dok je na unutarnjoj površini vodne liniji 878 panela.

Tablica 18. Osnovne značajke kontejnerskog broda S175

Duljina između okomica	L_{PP} (m)	175
Duljina vodne linije	L_{WL} (m)	178,248
Širina vodne linije	B_{WL} (m)	25,4
Visina	D (m)	15,4
Gaz	T (m)	9,5
Volumen istisnine	∇ (m ³)	24009
Masa istisnine	Δ (t)	24630112,83
Oplakana površina	S (m ²)	4927,60
Koeficijent punoće istisnine	C_B	0,569
Koeficijent glavnog rebra	C_M	0,980
Položaj težišta istisnine	CB (m)	5,207
Položaj težišta mase	CG (m)	9,550
Metacentarska visina	GM (m)	0,996
Bezdimenzijski radijus tromosti mase oko osi x	k_{xx}/B	0,328
Bezdimenzijski radijus tromosti mase oko osi y i z	$k_{yy}/L_{PP}, k_{zz}/L_{PP}$	0,24
Brzina	V (čv)	20,317
Froudeov broj	Fr	0,25

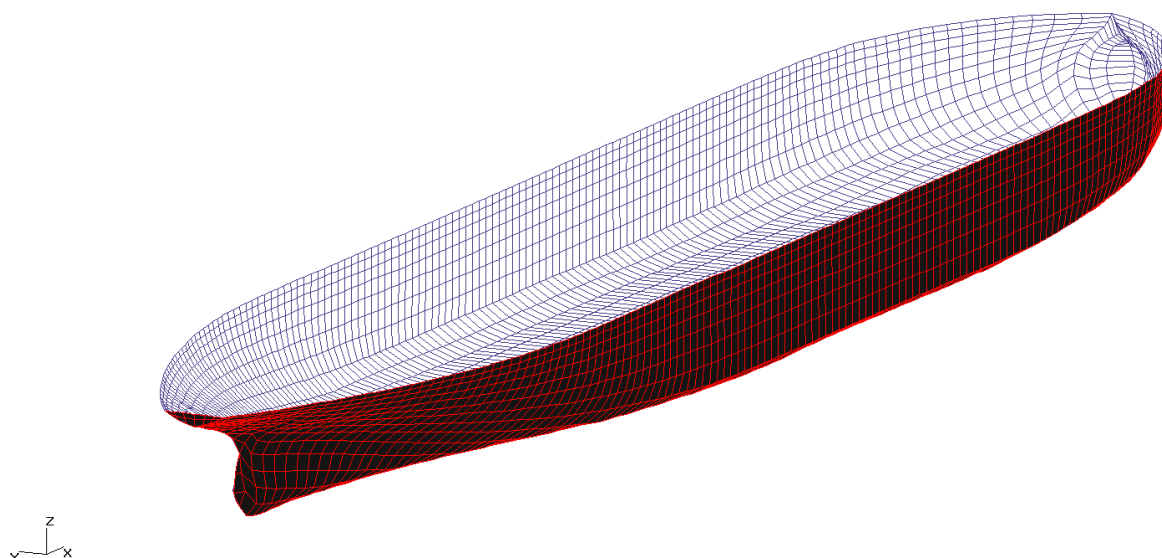


Slika 7. Panelni model kontejnerskog broda S175 za stanje punog opterećenja

Na slici 7. prikazan je panelni model kontejnerskog broda S175 za stanje punog opterećenja. Površina trupa diskretizirana je s 1259 panela, dok je unutarašnja površina vodne linije diskretizirana s 560 panela.

Tablica 19. Osnovne značajke tankera KVLCC2

Duljina između okomica	L_{PP} (m)	320
Duljina vodne linije	L_{WL} (m)	325,5
Širina vodne linije	B_{WL} (m)	58
Visina	D (m)	30
Gaz	T (m)	20,8
Volumen istisnine	∇ (m ³)	312622
Masa istisnine	Δ (t)	320709531,1
Oplakana površina	S (m ²)	27194
Koeficijent punoće istisnine	C_B	0,8098
Koeficijent glavnog rebra	C_M	0,998
Uzdužni položaj težišta mase	LCG (m)	11,1
Metacentarska visina	GM (m)	5,71
Bezdimenzijski radijus tromosti mase oko osi x	k_{xx}/B	0,40
Bezdimenzijski radijus tromosti mase oko osi y i z	$k_{yy}/L_{PP}, k_{zz}/L_{PP}$	0,25
Brzina	V (čv)	15,5
Froudeov broj	Fr	0,142



Slika 8. Panelni model tankera KVLCC2 za stanje punog opterećenja

Na slici 8. prikazan je panelni model tankera KVLCC2 za stanje punog opterećenja. Broj panela na površini trupa broda je 1931, dok unutarnja površina vodne linije ima 1507 panela.

4.1.1. Raspon valnih frekvencija

Raspon valnih frekvencija odnosno omjera valne duljine i duljine broda za koji je proveden numerički proračun odabran je prema podacima eksperimentalnih ispitivanja kako bi se eksperimentalni i numerički rezultati mogli usporediti. Za valove u pramac ($\beta = 180^\circ$) proračun je proveden za tri Froudeova broja odnosno za tri različite brzine kontejnerskog broda KCS i S175 te dva Froudeova broja odnosno dvije brzine za tanker KVLCC2 kao što je prikazano u tablicama 20.-22. Za ostale kutove nailaska valova ($\beta = 90^\circ; 120^\circ; 150^\circ$) numerički proračun proveden je samo za nominalne brzine.

Tablica 20. Froudeovi brojevi i odgovarajuće brzine kontejnerskog broda KCS

Froudeov broj Fr	Brzina v (m/s)
0,26	12,415
0,33	15,757
0,40	19,100

Tablica 21. Froudeovi brojevi i odgovarajuće brzine kontejnerskog broda S175

Froudeov broj Fn	Brzina v (m/s)
0,15	6,271
0,20	8,362
0,25	10,452

Tablica 22. Froudeovi brojevi i odgovarajuće brzine tankera KVLCC2

Froudeov broj Fn	Brzina v (m/s)
0,142	8,023
0,18	10,170

Vrijednost dodatnog otpora broda na valovima kao uzdužne komponente valne sile koja djeluje u suprotnom smjeru od brzine napredovanja broda, bezdimenzionalizirana je na temelju jednadžbe (100) u ovisnosti o omjeru λ / L . Omjer λ / L određen je na temelju duljine broda između okomica L_{pp} ili duljine na vodnoj liniji L_{wl} ovisno o dostupnim eksperimentalnim rezultatima. Usporedba eksperimentalnih rezultata dodatnog otpora na valovima za brodove KCS [31], S175 [32] te KVLCC2 [32] s numeričkim rezultatima dobivenim pomoću HydroSTAR-a prikazana je kao relativna standardna devijacija odnosno relativno standardno odstupanje kako slijedi:

$$RD = \frac{R_{AW}^{HydroSTAR} - R_{AW}^{EXP}}{R_{AW}^{EXP}} \cdot 100\% \quad (109)$$

Frekvencije nailaznih valova moguće je odrediti na temelju valnog broja pomoću disperzivne jednadžbe kako slijedi:

$$\omega = \sqrt{kg \operatorname{th}(kd)} \quad (110)$$

a uzimajući u obzir uvjet duboke vode, odnosno $d \rightarrow \infty$ slijedi izraz po kojem su frekvencije valova određene za potrebe proračuna HydroSTAR-om:

$$\operatorname{th}(kd) = 1 \quad (111)$$

$$\omega = \sqrt{kg} \quad (112)$$

Valne frekvencije određene pomoću izraza (112) su prikazane u tablicama 23.-30.

Tablica 23. Frekvencije nailaznih valova za brod KCS pri $Fn = 0,26$

λ/L_{pp}	Valna duljina λ (m)	Valni broj k (1/m)	Frekvencija vala ω (rad/s)
0,497	114,264	0,05499	0,7343
1,118	257,094	0,02444	0,4896
1,321	303,752	0,02069	0,4504
1,474	338,983	0,01854	0,4263
1,946	447,534	0,01404	0,3711

Tablica 24. Frekvencije nailaznih valova za brod KCS pri $Fn = 0,33$

λ/L_{pp}	Valna duljina λ (m)	Valni broj k (1/m)	Frekvencija vala ω (rad/s)
1,128	259,475	0,02422	0,4873
1,304	299,943	0,02095	0,4532
1,480	340,400	0,01846	0,4255
1,946	447,534	0,01404	0,3711

Tablica 25. Frekvencije nailaznih valova za brod KCS pri $Fn = 0,40$

λ/L_{pp}	Valna duljina λ (m)	Valni broj k (1/m)	Frekvencija vala ω (rad/s)
1,128	259,475	0,02422	0,4873
1,304	299,943	0,02095	0,4532
1,480	340,400	0,01846	0,4255
1,946	447,534	0,01404	0,3711

Tablica 26. Frekvencije nailaznih valova za brod S175 pri $Fn = 0,15$

λ/L_{pp}	Valna duljina λ (m)	Valni broj k (1/m)	Frekvencija vala ω (rad/s)
0,575	102,493	0,06130	0,7754
0,664	118,357	0,05309	0,7215
0,796	141,885	0,04428	0,6590
1,053	187,695	0,03348	0,5730
1,177	209,798	0,02995	0,5419
1,239	220,849	0,02845	0,5282
1,327	236,535	0,02656	0,5104
1,522	271,293	0,02316	0,4766

Tablica 27. Frekvencije nailaznih valova za brod S175 pri $Fn = 0,20$

λ/L_{pp}	Valna duljina λ (m)	Valni broj k (1/m)	Frekvencija vala ω (rad/s)
0,500	89,124	0,07050	0,8315
0,572	101,958	0,06163	0,7774
0,668	119,070	0,05277	0,7194
0,803	143,133	0,04390	0,6561
0,866	154,363	0,04070	0,6318
1,000	178,248	0,03525	0,5879
1,118	199,281	0,03153	0,5561
1,118	199,281	0,03153	0,5561
1,256	223,879	0,02807	0,5246
1,335	237,961	0,02640	0,5089
1,662	296,248	0,02121	0,4561
1,836	327,263	0,01920	0,4339

Tablica 28. Frekvencije nailaznih valova za brod S175 pri $Fn = 0,25$

λ/L_{pp}	Valna duljina λ (m)	Valni broj k (1/m)	Frekvencija vala ω (rad/s)
0,586	104,436	0,06016	0,7681
0,670	119,383	0,05263	0,7184
0,815	145,215	0,04327	0,6514
0,911	162,455	0,03868	0,6159
1,122	199,919	0,03143	0,5552
1,256	223,790	0,02808	0,5247
1,339	238,710	0,02632	0,5081
1,544	275,179	0,02283	0,4732
2,000	356,496	0,01762	0,4157

Tablica 29. Frekvencije nailaznih valova za brod KVLCC2 pri $Fn = 0,142$

λ/L_{pp}	Valna duljina λ (m)	Valni broj k (1/m)	Frekvencija vala ω (rad/s)
0,179	58,1343	0,10808	1,0295
0,179	58,1343	0,10808	1,0295
0,200	65,1000	0,09652	0,9729
0,200	65,1000	0,09652	0,9729
0,232	75,5746	0,08314	0,9029
0,279	90,6895	0,06928	0,8243
0,402	130,8022	0,04804	0,6863
0,464	151,1492	0,04157	0,6385
0,464	151,1492	0,04157	0,6385
0,636	206,9594	0,03036	0,5456
0,636	206,9594	0,03036	0,5456
0,802	261,0230	0,02407	0,4859
0,927	301,7170	0,02082	0,4519
1,081	351,7125	0,01786	0,4186
1,670	543,5525	0,01156	0,3367

Tablica 30. Frekvencije nailaznih valova za brod KVLCC2 pri $Fn = 0,18$

λ/L_{pp}	Valna duljina λ (m)	Valni broj k (1/m)	Frekvencija vala ω (rad/s)
0,173	56,337	0,11153	1,0458
0,173	56,337	0,11153	1,0458
0,202	65,726	0,09560	0,9682
0,231	75,115	0,08365	0,9057
0,231	75,115	0,08365	0,9057
0,279	90,764	0,06923	0,8239
0,402	130,826	0,04803	0,6863
0,477	155,238	0,04047	0,6300
0,625	203,438	0,03089	0,5503
0,635	206,567	0,03042	0,5462
0,644	209,697	0,02996	0,5421
0,810	263,530	0,02384	0,4835
0,923	300,462	0,02091	0,4529

4.2. Definiranje ulaznih podataka za balastno stanje

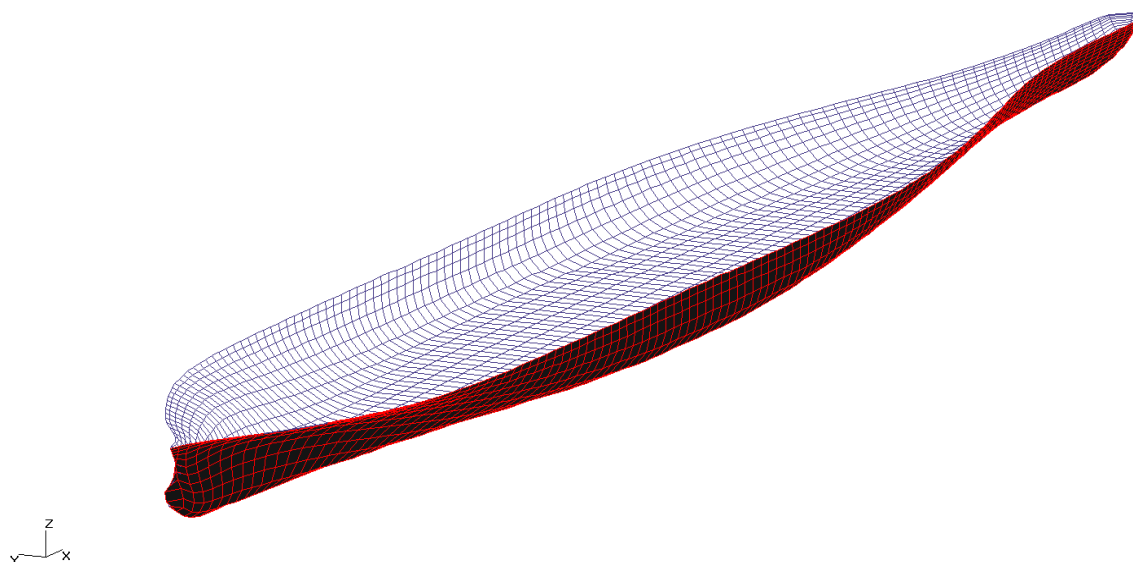
Dodatni otpor na valovima određen je i za balastno stanje kontejnerskog broda KCS [33] te tankera KVLCC2 [34]. Glavne razlike u formi između balastnog stanja i stanja punog opterećenja su prikazane u tablicama 31. i 32. Karakteristike nailaznih valova i Froudeov broj isti su kao i za stanje punog opterećenja. Također, rezultati dodatnog otpora u balastnom stanju uspoređeni su s dostupnim eksperimentalnim podacima za tanker KVLCC2 [34].

Tablica 31. Osnovne značajke kontejnerskog broda KCS u balastnom stanju

Gaz na pramcu	T_F (m)	4,53
Gaz na krmi	T_A (m)	8,90
Volumen istisnine	∇ (m ³)	29580
Položaj težišta mase broda po visini	KG (m)	5,46

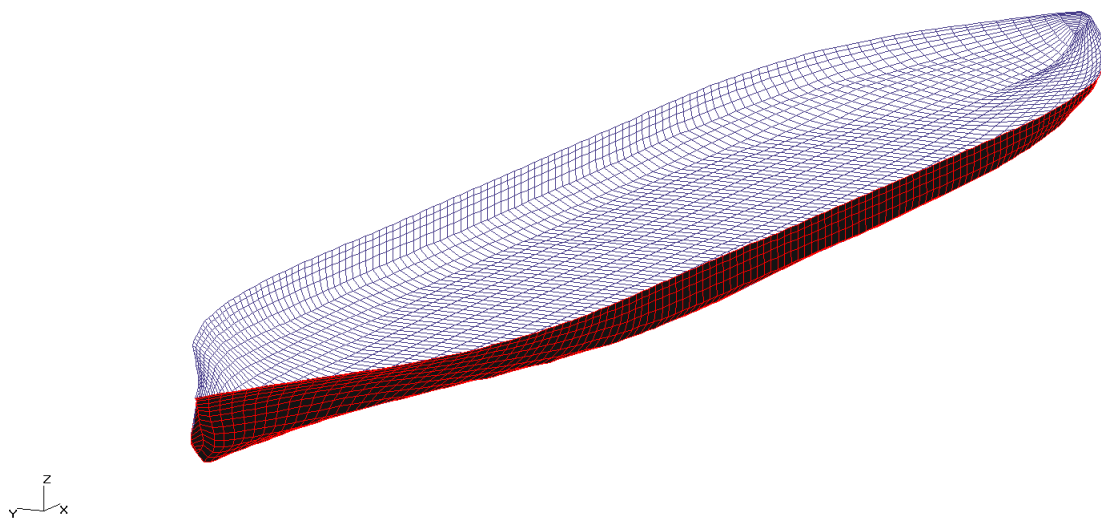
Tablica 32. Osnovne značajke tankera KVLCC2 u balastnom stanju

Gaz na pramcu	T_F (m)	6,70
Gaz na krmi	T_A (m)	11,90
Volumen istisnine	∇ (m ³)	123910
Položaj težišta mase broda po visini	KG (m)	14



Slika 9. Panelni model kontejnerskog broda KCS za balastno stanje

Na slici 9. prikazan je panelni model kontejnerskog broda KCS za balastno stanje. Broj panela na površini trupa broda je 1342, dok unutarnja površina vodne linije ima 739 panela.



Slika 10. Panelni model tankera KVLCC2 za balastno stanje

Na slici 10. prikazan je panelni model tankera KVLCC2 za balastno stanje. Broj panela na površini trupa broda je 1848, dok unutarnja površina vodne linije ima 1215 panela.

4.3. Variranje položaja težišta mase broda i radijusa tromosti mase

Pri određivanju dodatnog otpora broda na valovima potrebno je što preciznije procijeniti položaj težišta mase te radijuse tromosti mase, jer su ti podaci često nepoznati u ranoj fazi projektiranja broda. Raspon variranja položaja težišta mase broda po visini te radijusa tromosti mase određen je prema proceduri opisanoj u poglavlju 2. nakon što su pomoću približnih metoda određene njihove referentne vrijednosti. Dakle, na temelju rezultata približnih metoda određivanja položaja težišta mase broda te radijusa tromosti mase ustanovljeno je koliko te vrijednosti odstupaju od stvarnih te je sukladno tome određen objektivan raspon variranja tih vrijednosti.

Položaj težišta mase broda \overline{KG} , određen približnim metodama iz poglavlja 2.2., variran je na način da se stvarna vrijednost položaja težišta mase uvećala za 0,5 m, 1 m i 2 m te isto tako umanjila za 0,5 m, 1 m i 2 m.

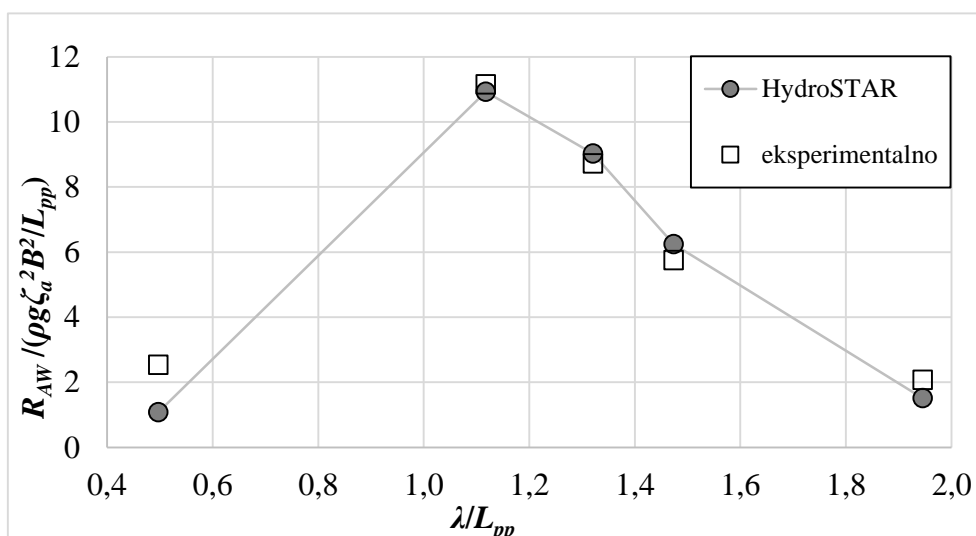
Na isti način određen je i raspon variranja radijusa tromosti mase. Na temelju metoda približnog određivanja radijusa tromosti mase iz poglavlja 2.3., numerički proračuni provedeni su za radijuse tromosti mase u iznosu $0,3B$, $0,35B$ i $0,4B$ oko x osi te $0,24L_{pp}$, $0,25L_{pp}$ i $0,26L_{pp}$ oko y odnosno oko z osi.

5. REZULTATI PRORAČUNA DODATNOG OTPORA BRODA NA PRAVILNIM VALOVIMA

Utjecaj značajki mase broda odnosno položaja težišta mase broda po visini i radijusa tromosti mase na dodatni otpor prikazan je u poglavlju 5. Navedeni parametri analizirani su za dva kontejnerska broda KCS i S175 te tanker KVLCC2. Ispitane su dvije odnosno tri brzine brodova ovisno o dostupnim eksperimentalnim podacima. Za KCS raspon brzina kreće se od 12,415 do 19,1 m/s što odgovara rasponu Froudeovih brojeva od 0,26 do 0,4, dok se za S175 raspon brzina kreće od 6,271 do 10,452 m/s što odgovara rasponu Froudeovih brojeva od 0,15 do 0,25. Za tanker KVLCC2 su ispitane dvije brzine, 8,023 m/s i 10,170 m/s, odnosno dva Froudeova broja 0,142 i 0,18. Razmatrani su i različiti kutovi nailaska valova na brod pri čemu su ispitane samo projektne brzine.

5.1. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata dodatnog otpora na pravilnim valovima u pramac

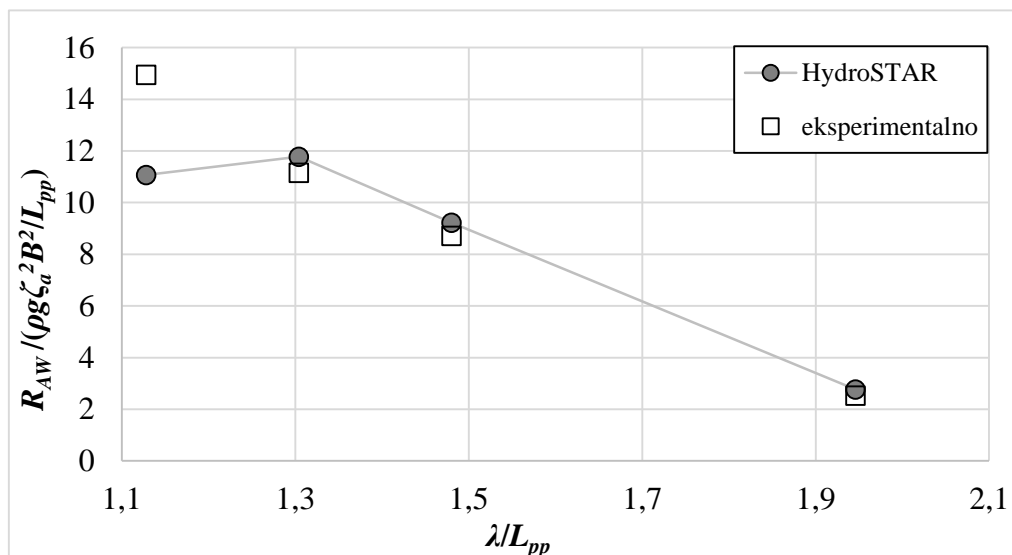
Kako bi se procijenilo relativno odstupanje između eksperimentalnih i numeričkih rezultata, numerički dobiveni dodatni otpor na pravilnim valovima uspoređen je s dostupnim eksperimentalnim podacima u ovisnosti o omjeru duljine vala i duljine broda kao što je prikazano na slikama 11.-18.



Slika 11. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KCS pri $Fr = 0,26$

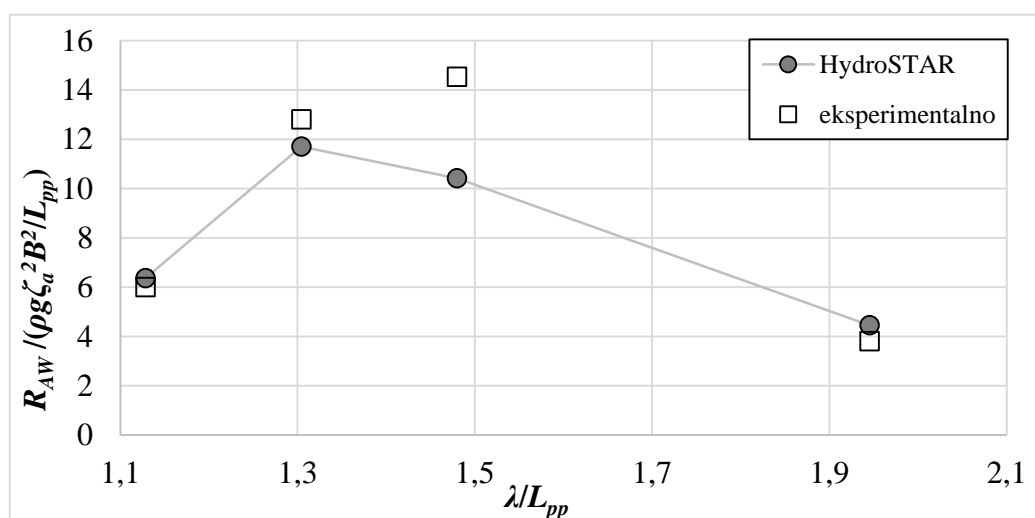
Numerički rezultati za kontejnerski brod KCS pri $Fr = 0,26$ dobro se podudaraju s eksperimentalnim podacima kao što se vidi na slici 11. U području kratkih valova, relativna devijacija između rezultata je oko -57%, što je i očekivano jer programski paket HydroSTAR ne može dobro opisati nelinearnost na visokim valnim frekvencijama. S druge strane, u

području dugih valova maksimalna relativna devijacija je -27%, pri čemu je potrebno imati na umu da su na vrlo dugačkim valovima vrijednosti dodatnog otpora vrlo male. Također je moguće primijetiti da su maksimalne vrijednosti dodatnog otpora dobivene numeričkim i eksperimentalnim putem približno jednake.



Slika 12. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KCS pri $Fr = 0,33$

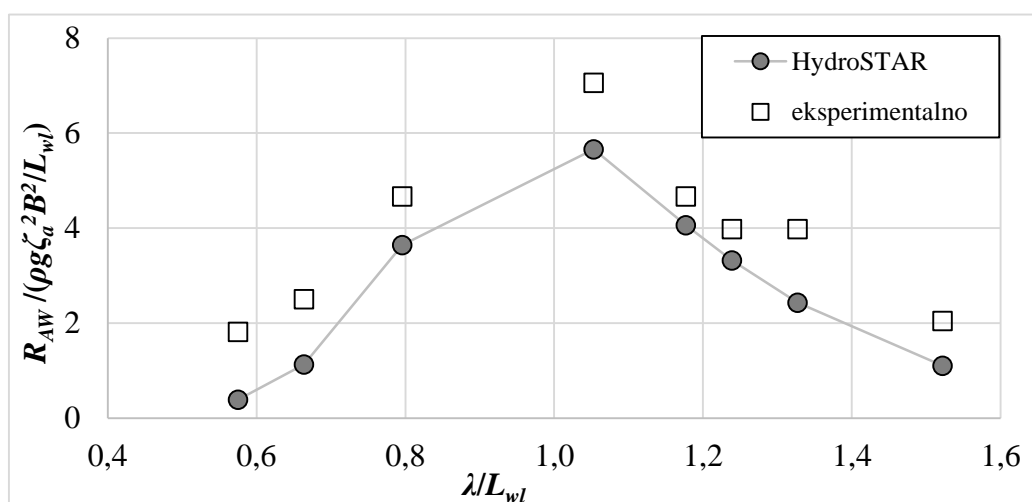
Na slici 12. prikazani su rezultati dodatnog otpora na valovima kontejnerskog broda KCS pri većoj brzini odnosno pri $Fr = 0,33$. Trend eksperimentalnih i numeričkih rezultata je isti osim u području kratkih valova, gdje numerički rezultati za prvu mjernu točku pokazuju relativnu devijaciju od -26%. Pri još većoj brzini, odnosno pri $Fr = 0,4$, moguće je primijetiti veća odstupanja rezultata, posebice za $\lambda / L_{pp} \approx 1,5$, gdje relativna devijacija iznosi -28%, slika 13. Također je važno napomenuti da se maksimalne vrijednosti dodatnog otpora dobivene numeričkim i eksperimentalnim putem nalaze se na različitim vrijednostima λ / L_{pp} .



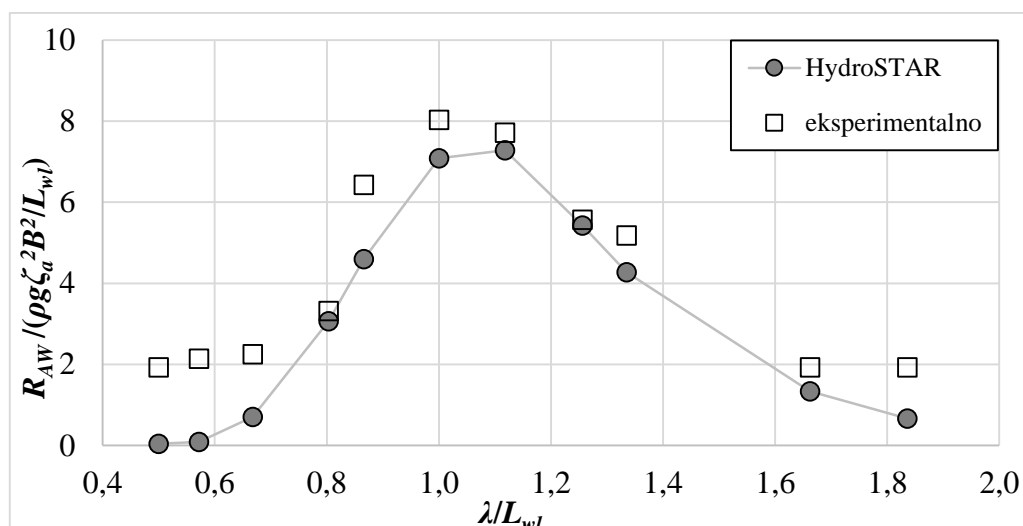
Slika 13. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KCS pri $Fr = 0,4$

Za kontejnerski brod S175 vidljivo je odstupanje između numeričkih i eksperimentalnih rezultata za cijeli raspon omjera λ / L_{wl} , a posebno u području visokih frekvencija kao što je prikazano na slikama 14.-16. Naime, pri visokim frekvencijama vrijednosti bezdimenzijskog dodatnog otpora su otprilike dva puta manje u odnosu na eksperimentalne vrijednosti. Izuzevši rezultate dodatnog otpora pri najvišim frekvencijama, maksimalna relativna devijacija između dobivenih vrijednosti i eksperimentalnih podataka je oko -40%. Iako su dobiveni rezultati za sva tri Froudeova broja podcijenjeni, trend krivulje je dobro opisan.

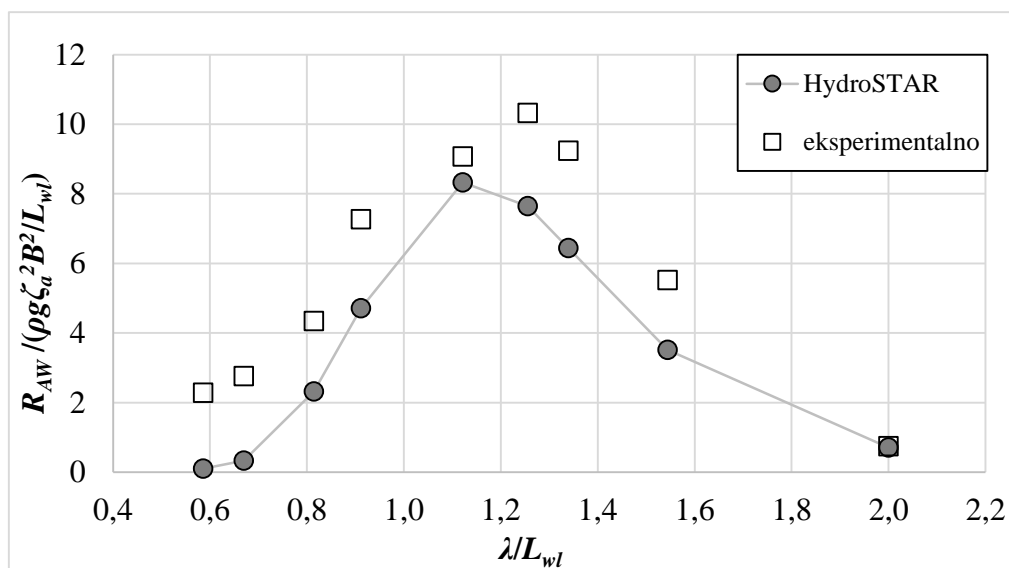
Također, u području niskih frekvencija gdje su relativna gibanja broda mala, a apsolutna gibanja velika, niske vrijednosti bezdimenzijskog dodatnog otpora uzrokuju velika odstupanja između numeričkih i eksperimentalnih rezultata.



Slika 14. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za S175 pri $Fr = 0,15$

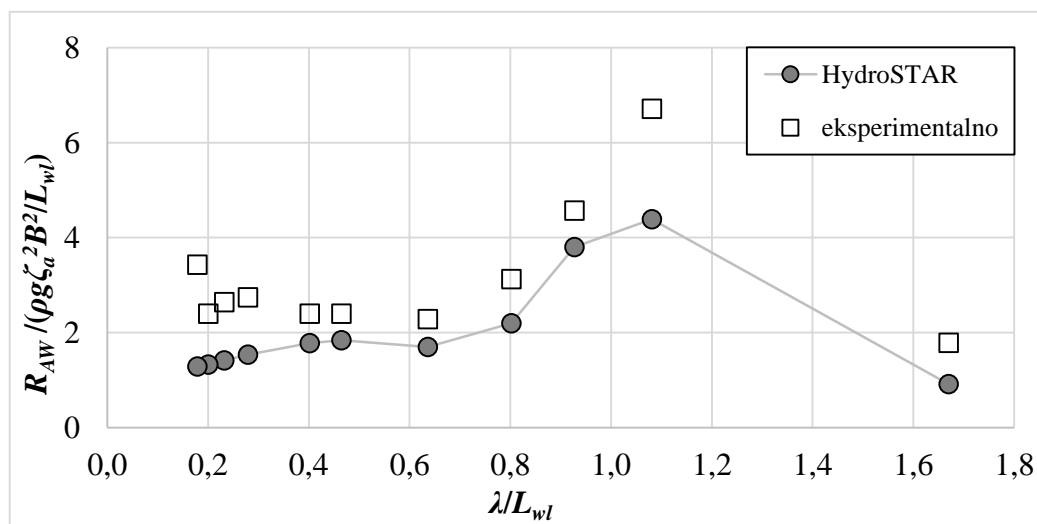


Slika 15. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za S175 pri $Fr = 0,2$



Slika 16. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za S175 pri $Fr = 0,25$

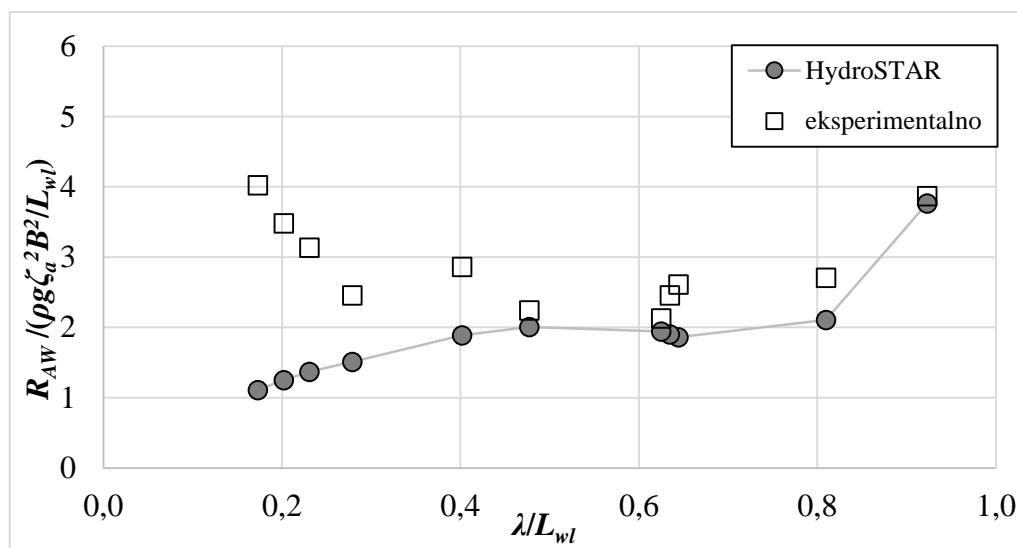
Na slici 17. su prikazani rezultati dodatnog otpora na valovima za tanker KVLCC2. Iako je trend numeričkih i eksperimentalnih rezultata dodatnog otpora gotovo isti, dobivene numeričke vrijednosti su podcijenjene za cijeli promatrani raspon omjera λ / L_{wl} . Uslijed izraženih nelinearnih učinaka u području vrlo kratkih valova, maksimalna relativna devijacija iznosi oko -60%. S druge strane, maksimalna relativna devijacija u području dugačkih valova iznosi oko -50%.



Slika 17. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$

Porastom Froudevog broja su također vidljiva stanovita odstupanja, gdje dobiveni numerički rezultati podcijenjuju eksperimentalne podatke u većem dijelu raspona omjera λ / L_{wl} , slika 18. To je posebice izraženo na vrlo kratkim valovima, gdje nelinearni učinci dolaze do izražaja, stoga je potrebno za to područje primijeniti odgovarajuću korekciju rezultata. Također je

moгуće primijetiti određene nedosljednosti između numeričkih i eksperimentalnih rezultata na kratkim valovima, gdje se vrijednosti bezdimenzijskog dodatnog otpora značajno razlikuju.

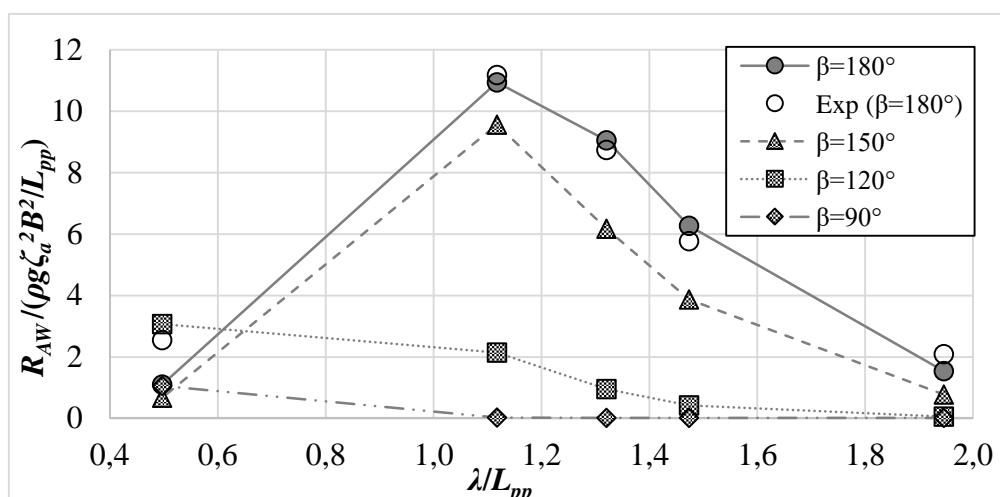


Slika 18. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KVLCC2 pri $Fr = 0,18$

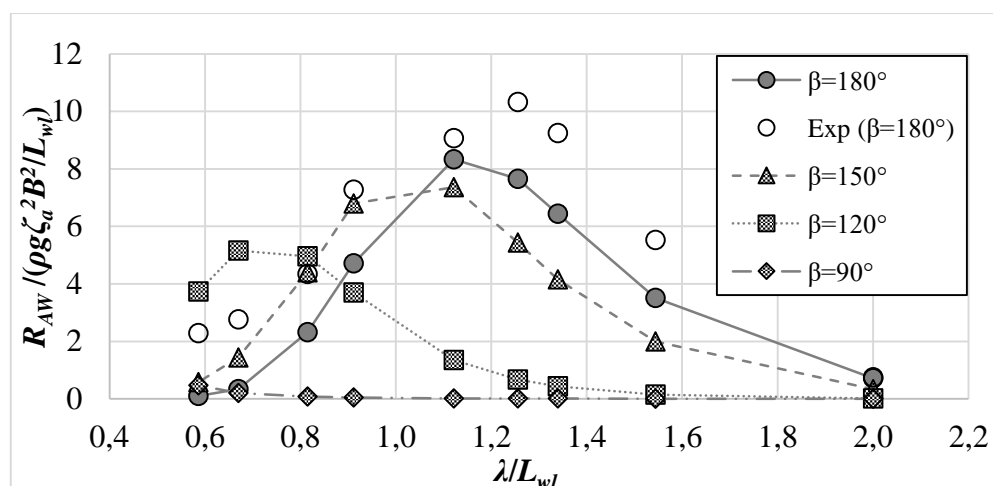
Potrebno je napomenuti da su pri vrlo sličnom rasponu omjera valne duljine i duljine broda, vrijednosti dodatnog otpora u području kratkih valova za tanker KVLCC2 veće u odnosu na dva preostala kontejnerska broda za sve Froudeove brojeve

5.2. Usporedba rezultata dodatnog otpora na pravilnim valovima za različite kutove nailaska valova

Dodatni otpor na valovima, kao uzdužna komponenta valne sile F_x pri kutu nailaska $\beta = 180^\circ$ uspoređen je s vrijednostima dobivenim za preostale kutove nailaska valova što je prikazano na slici 19. Kod valova koso u pramac odnosno pri $\beta = 150^\circ$ može se primijetiti isti trend krivulje dodatnog otpora kao i kod valova u pramac, ali su dobivene vrijednosti dodatnog otpora manje što je i očekivano zbog utjecaja komponente F_y odnosno sile zanošenja. Pri $\beta = 120^\circ$ na vrlo kratkim valovima prisutan je utjecaj komponenata F_x i F_y , dok su na vrlo dugačkim valovima relativna gibanja mala pa dodatni otpor teži prema nuli, gdje je prisutna samo F_y komponenta sile zanošenja. Kod bočnih valova, $\beta = 90^\circ$, sila zanošenja je dominantna sila u cijelom rasponu omjera λ / L_{pp} .

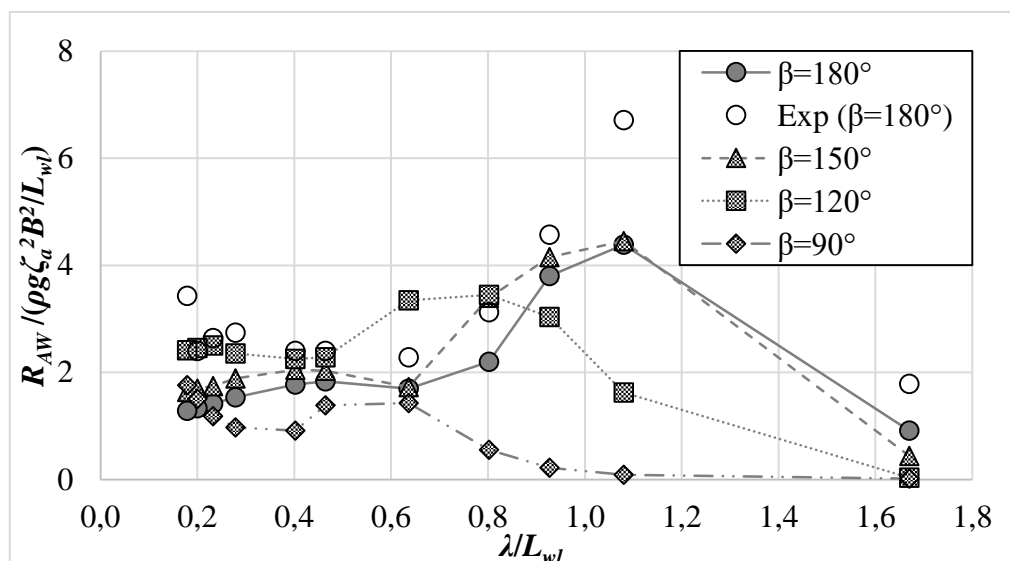


Slika 19. Usporedba rezultata dodatnog otpora za različite kutove nailaska valova za KCS pri $Fr = 0,26$



Slika 20. Usporedba rezultata dodatnog otpora za različite kutove nailaska valova za S175 pri $Fr = 0,25$

Vrijednosti dodatnog otpora za S175 pri različitim kutovima nailaska valova su prikazane na slici 20. Kao i u slučaju kontejnerskog broda KCS, kod valova koso u pramac dodatni otpor prati isti trend rezultata kao i kod valova u pramac. Moguće je primijetiti da na visokim i umjerenim frekvencijama ($\lambda/L_{wl} \leq 1$) bezdimenzijska vrijednost dodatnog otpora pri $\beta = 150^\circ$ poprima veće vrijednosti nego pri $\beta = 180^\circ$. Kod bočnih valova, $\beta = 90^\circ; 120^\circ$, vrijednosti dodatnog otpora pri nižim frekvencijama teže brže prema nuli nego za slučaj $\beta = 150^\circ$ i $\beta = 180^\circ$. Također je moguće vidjeti da se najveća vrijednost dodatnog otpora pri višim frekvencijama (do $\lambda/L_{wl} \approx 0,8$) postiže za slučaj kuta nailaska valova $\beta = 120^\circ$.



Slika 21. Usporedba rezultata dodatnog otpora za različite kutove nailaska valova za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$

Na temelju vrijednosti dodatnog otpora tankera KVLCC2 vidljiva su početna stanovita odstupanja između numeričkih i eksperimentalnih rezultata za valove u pramac pa su prema tome vidljive određene nedosljednosti i za preostale kutove nailaska valova kao što je prikazano na slici 21. U području visokih i umjerenih frekvencija do $\lambda / L_{wl} \approx 1$, dodatni otpor na valovima u pramac je manji nego na valovima koso u pramac, odnosno pri $\beta = 150^\circ$.

5.3. Analiza utjecaja položaja težišta mase broda na dodatni otpor broda na valovima u pramac

Budući da gibanja broda najviše utječu na dodatni otpor na valovima, razmatran je utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima. Variran je položaj težišta mase broda po visini dok je uzdužni i poprečni položaj težišta ostao konstantan, kako bi se izbjegao bočni nagib ili trim broda. Obzirom da se gibanja broda računaju oko položaja težišta mase broda, položaj težišta mase važan je za rješenje jednadžbe dinamičke ravnoteže. Hidrodinamičke i promjenjive hidrostatičke sile te momenti uravnoteženi su inercijskim silama i momentima mase [2]. Jednadžba dinamičke ravnoteže glasi:

$$([M] + [A])\{\ddot{\eta}_j\} + [B]\{\dot{\eta}_j\} + [C]\{\eta_j\} = \zeta_a \{F_j(t)\} \quad (113)$$

gdje je:

$[M]$ - matrica mase tijela i momenata tromosti mase,

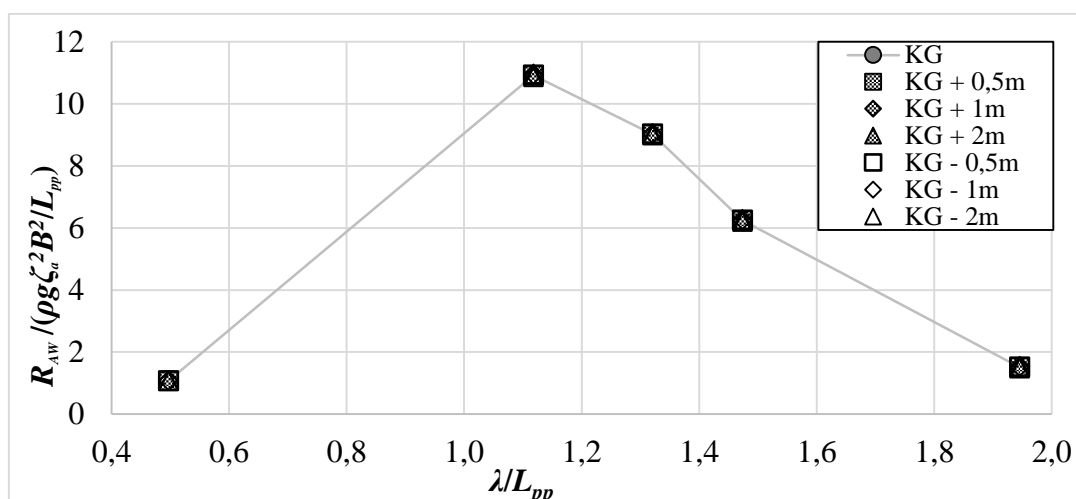
$[A]$ - matrica dodatne mase,

$[B]$ - matrica prigušenja,

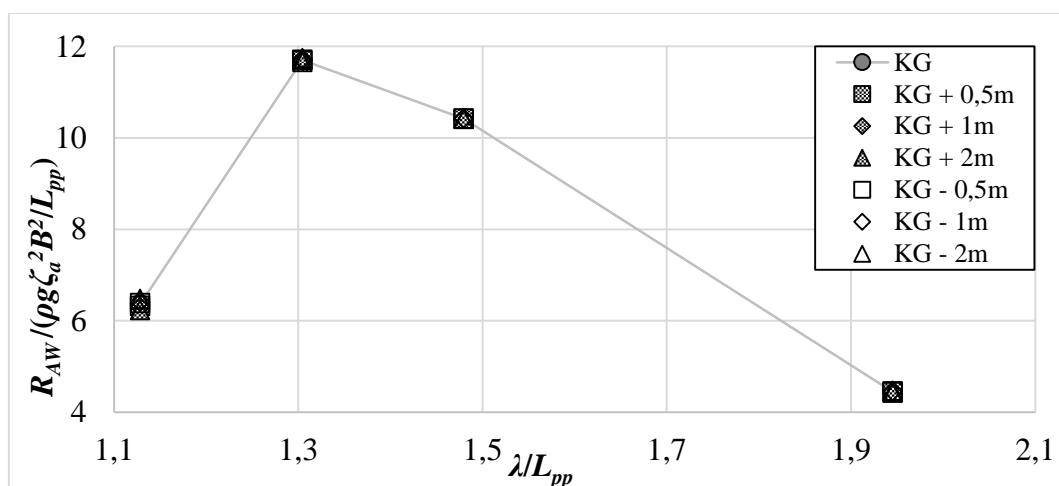
$[C]$ - matrica povratnih sila,

$F_j(t)$ - hidrodinamička uzbudna sila.

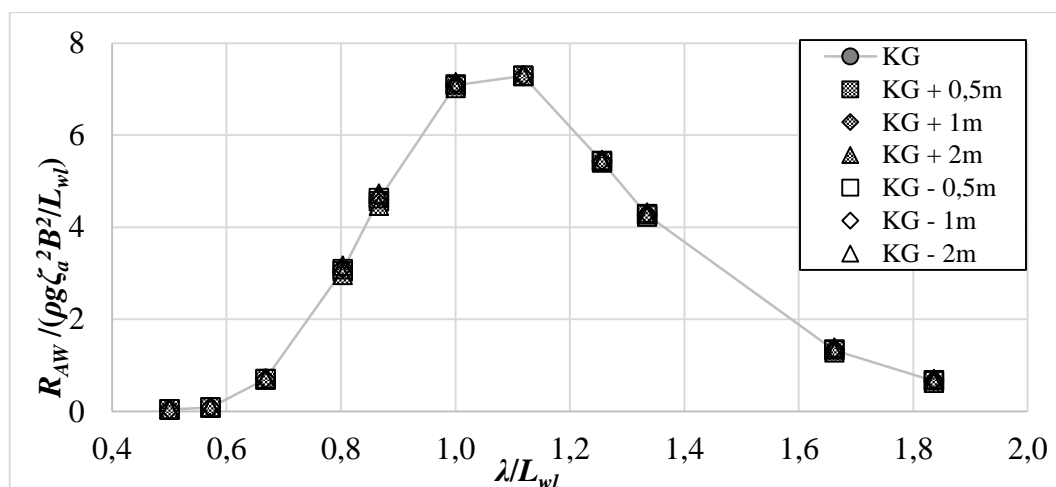
Kao što se vidi na slikama 22.-27., utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima je gotovo zanemariv. Razmatrajući pojedine članove u jednadžbi dinamičke ravnoteže, moguće je zaključiti da je matrica masa, nakon variranja položaja težišta mase broda, ostala nepromijenjena. To je i očekivano, jer je koordinatni sustav postavljen u težište broda. S druge strane, pojedini članovi unutar matrica dodatne mase i prigušenja nakon variranja se neznatno mijenjaju posebice za slučaj poniranja i posrtanja. Također, u matrici povratnih sila, uzdužna metacentarska visina koja poprima veliku vrijednost neznatno se mijenja pomicanjem težišta mase broda po visini te tako ne utječe na dodatni otpor broda na valovima.



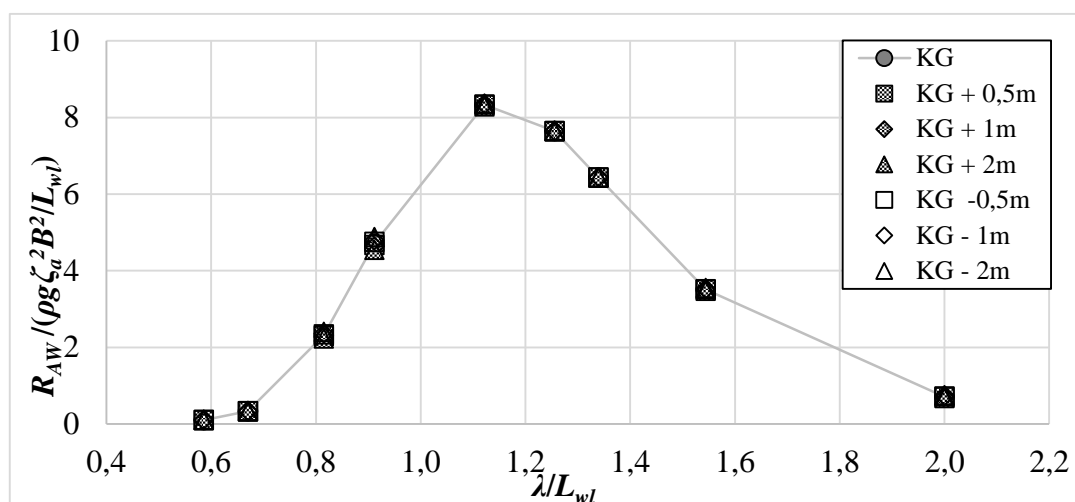
Slika 22. Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,26$



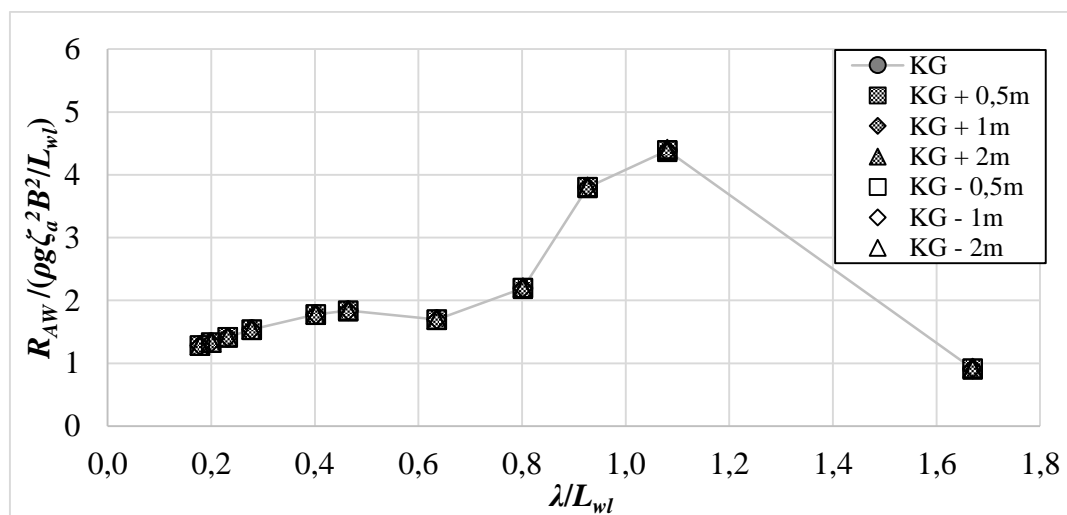
Slika 23. Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,40$



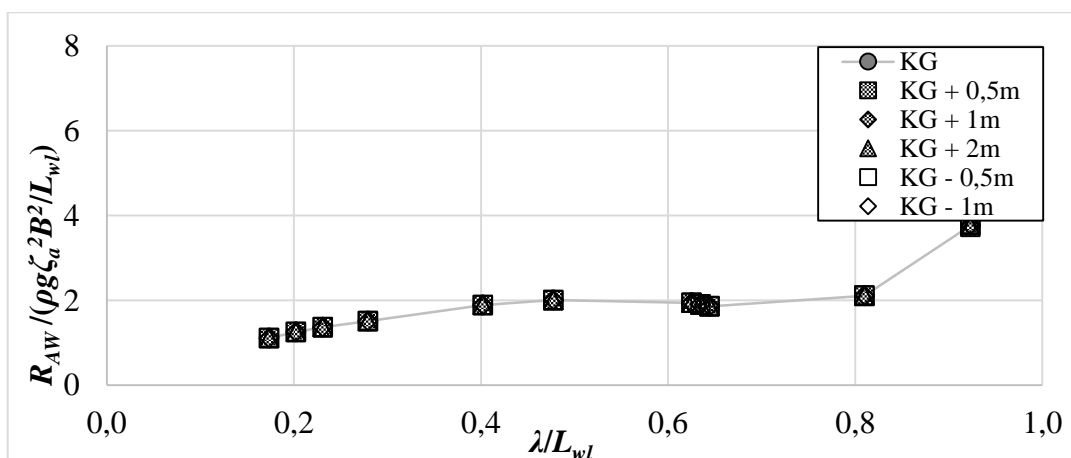
Slika 24. Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,20$



Slika 25. Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,25$



Slika 26. Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$

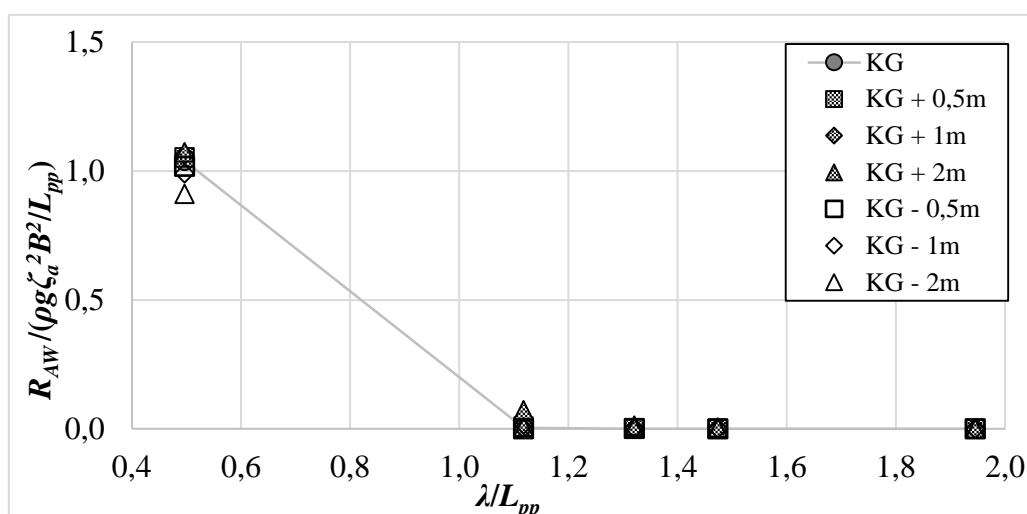


Slika 27. Utjecaj položaja težišta mase na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,18$

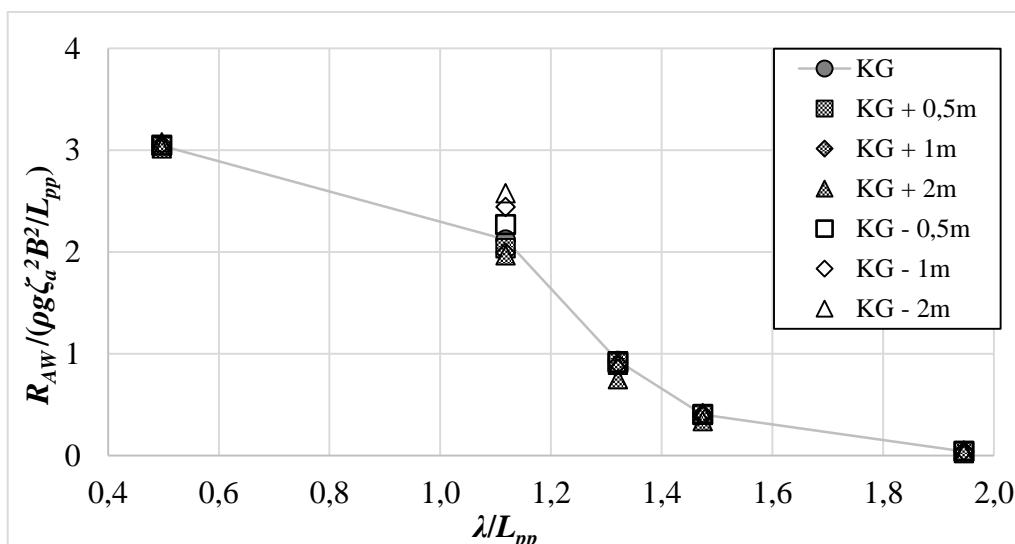
5.3.1. Analiza utjecaja položaja težišta mase broda na dodatni otpor broda za različite kutove nailaska valova

Promjenom položaja težišta mase za dva kontejnerska broda KCS i S175 u slučaju bočnih valova, $\beta = 120^\circ$ i $\beta = 90^\circ$, moguće je uočiti određeni utjecaj na dodatni otpor na valovima u području kratkih i umjerenih valova, slike 28., 29., 31. i 32. S druge strane, za slučaj valova koso u pramac, slično kao i kod valova u pramac, utjecaj pomaka položaja težišta na dodatni otpor je neznatčan, slike 30. i 33.

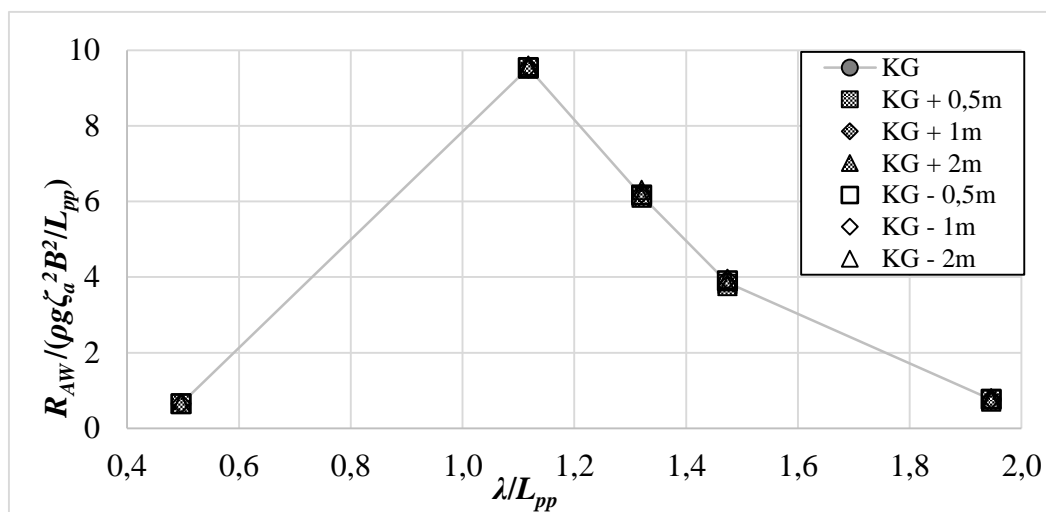
Za slučaj tankera KVLCC2 utjecaj pomaka \overline{KG} zanemariv je kod svih promatranih kutova nailaska valova što je moguće vidjeti na slikama 34.-36.



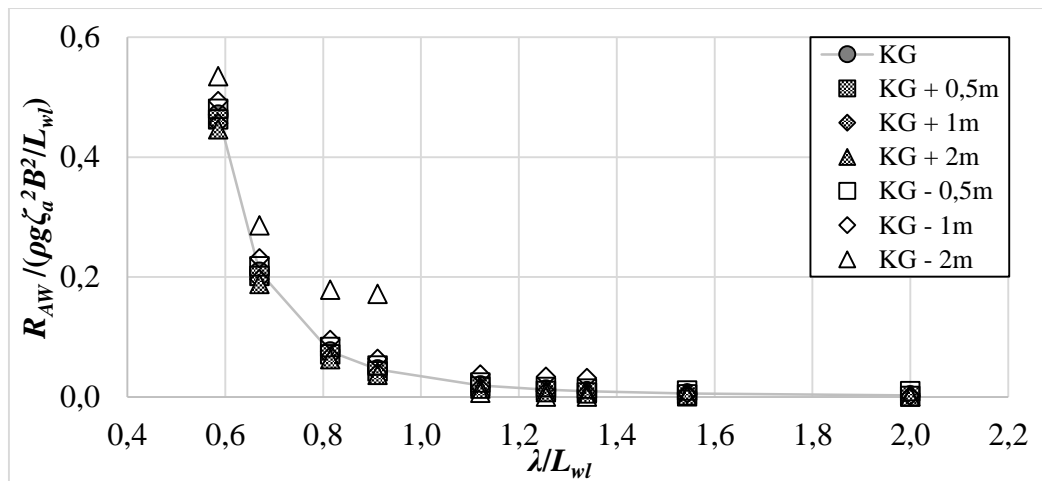
Slika 28. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



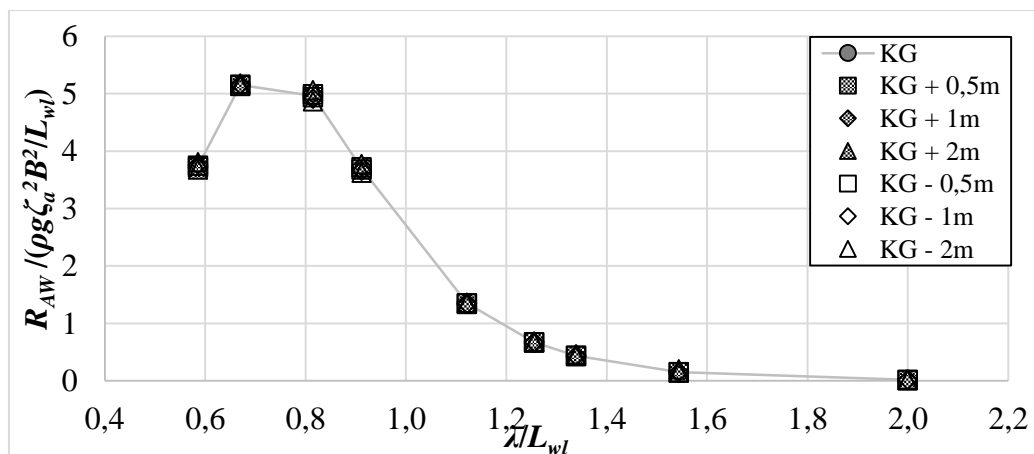
Slika 29. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



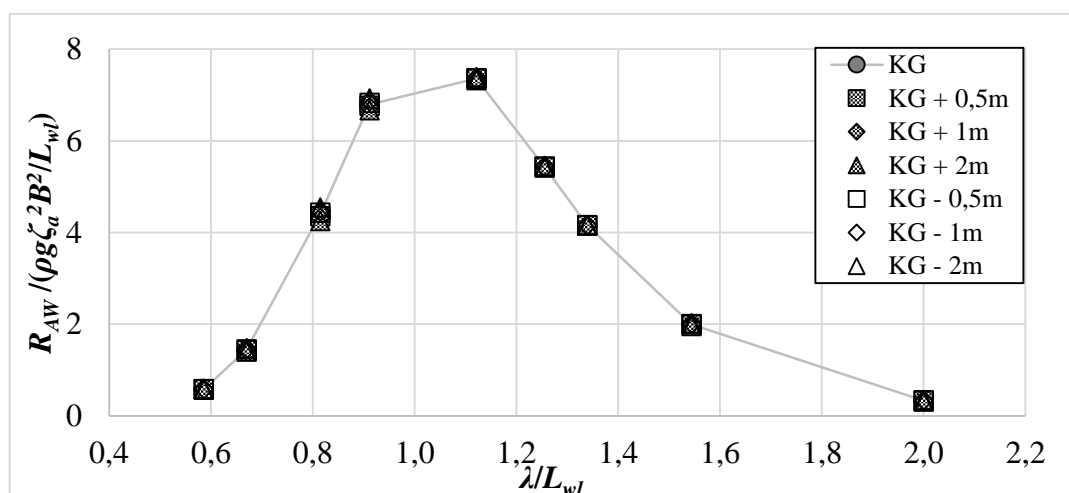
Slika 30. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



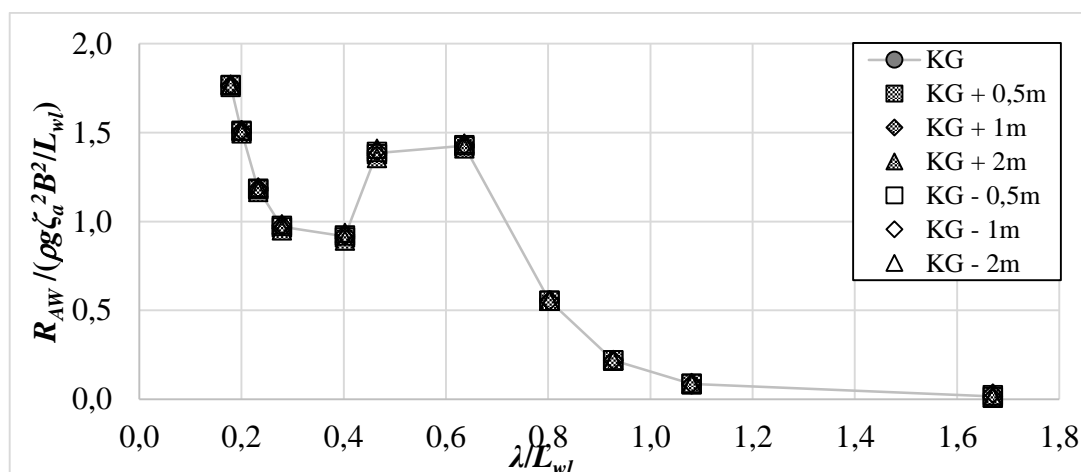
Slika 31. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



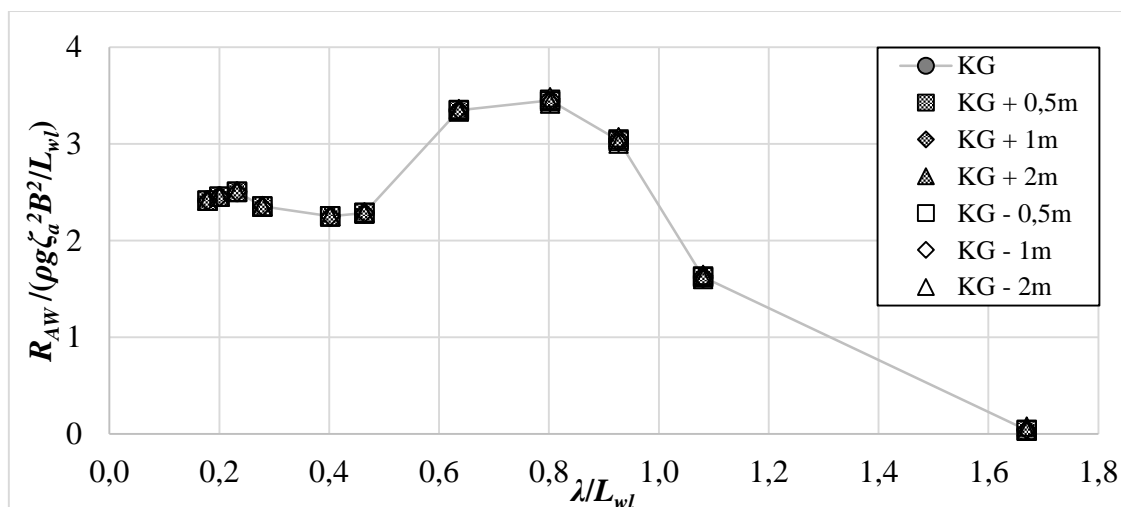
Slika 32. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



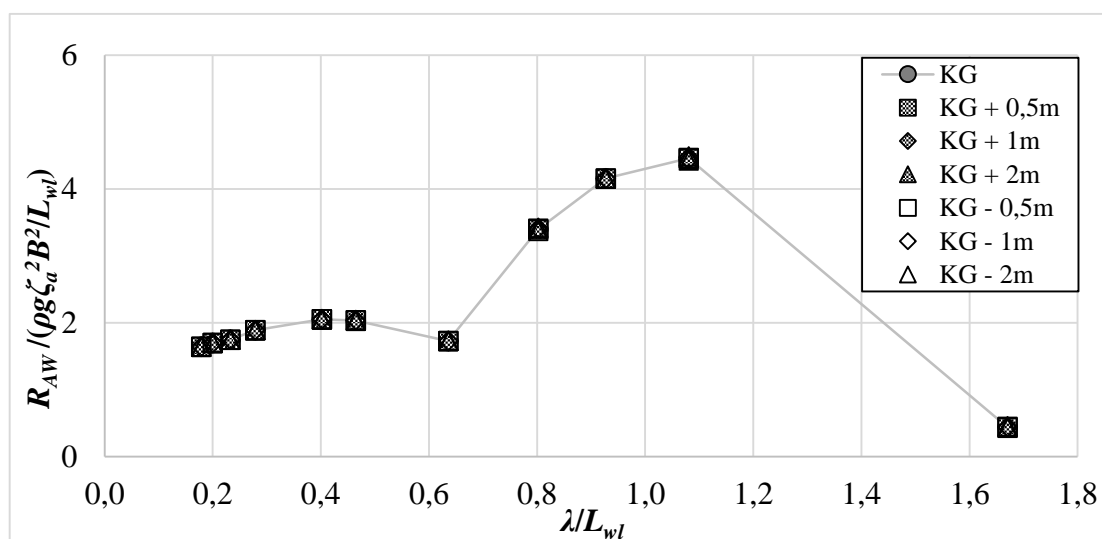
Slika 33. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



Slika 34. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$



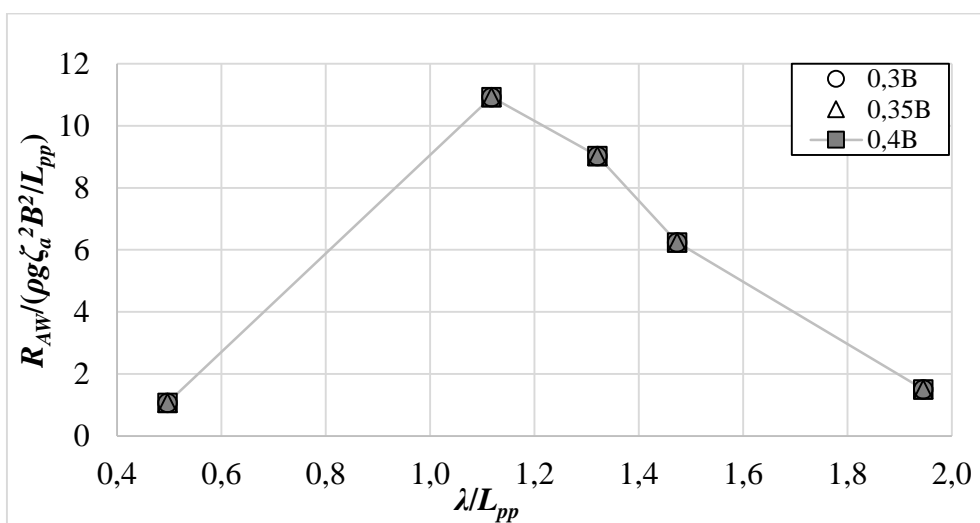
Slika 35. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$



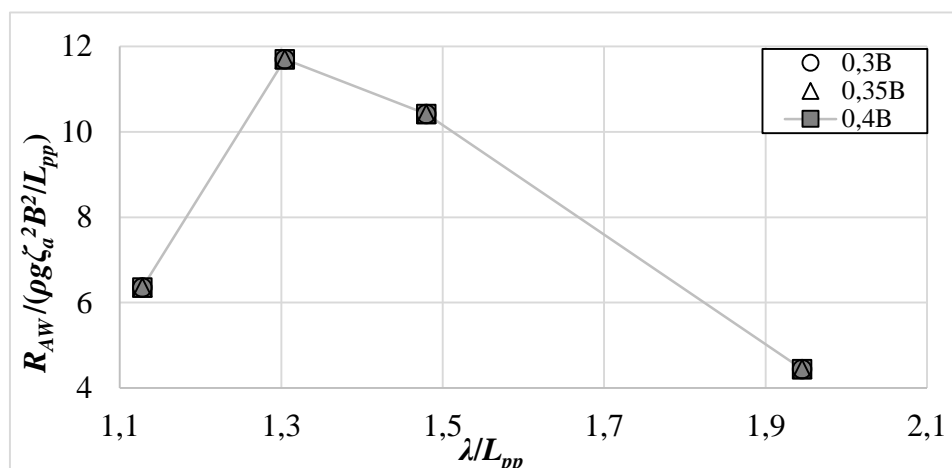
Slika 36. Utjecaj položaja težišta mase broda na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$

5.4. Analiza utjecaja radijusa tromosti mase broda oko osi x na dodatni otpor broda na valovima u pramac

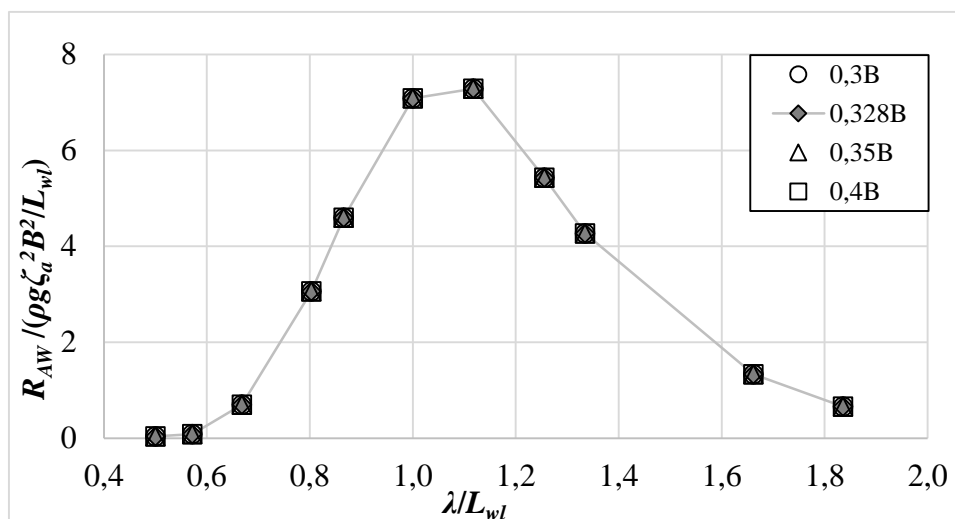
Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor broda na pravilnim valovima u pramac je zanemariv što je moguće vidjeti na slikama 37.-42. Obzirom da kod valova u pramac ne dolazi do ljuljanja broda, radijusi tromosti mase oko osi x ne utječu na dodatni otpor, što je bilo i za očekivati. Proračun je proveden za dva Froudeova broja odnosno za dvije različite brzine: projektnu i maksimalnu.



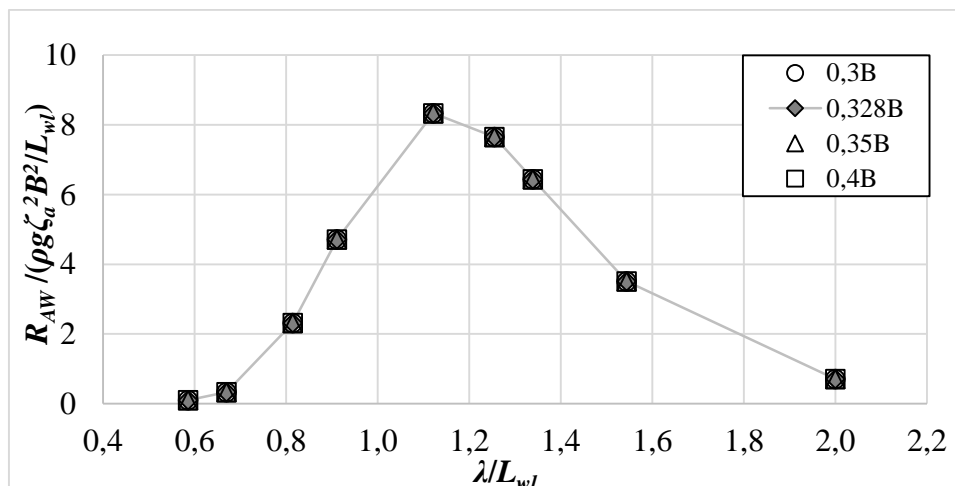
Slika 37. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,26$



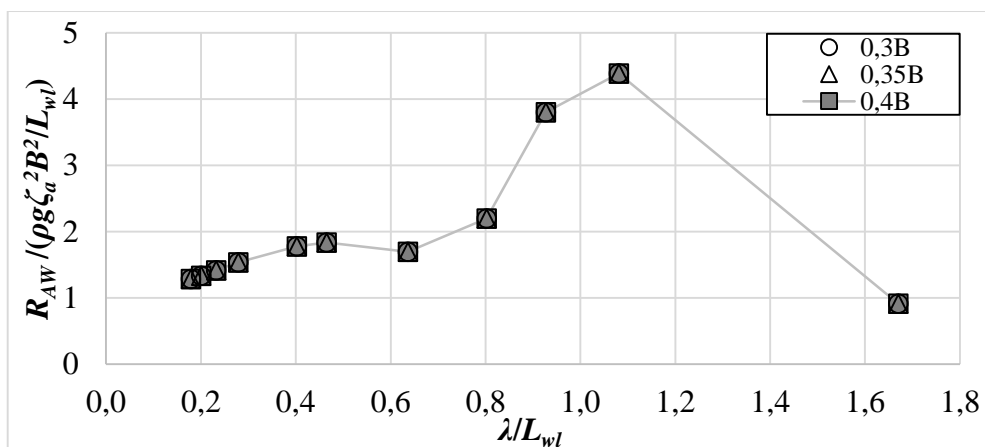
Slika 38. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,4$



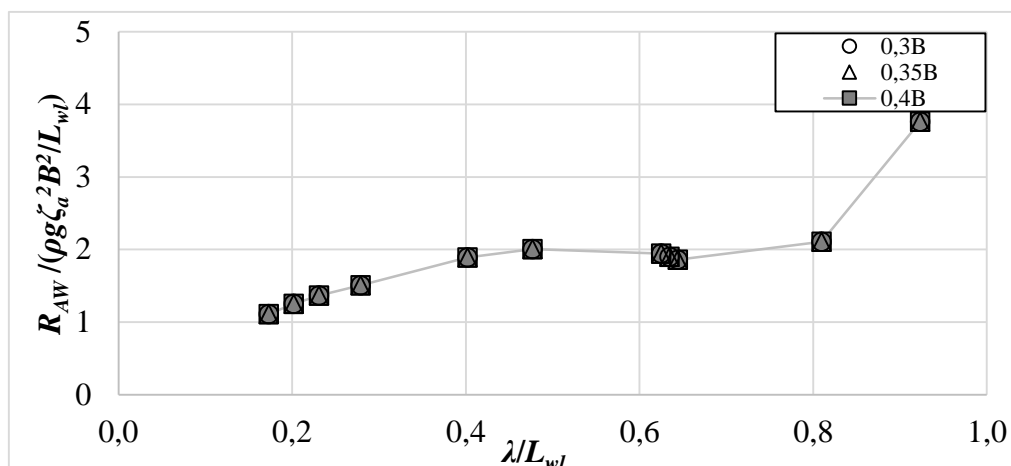
Slika 39. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,20$



Slika 40. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,25$



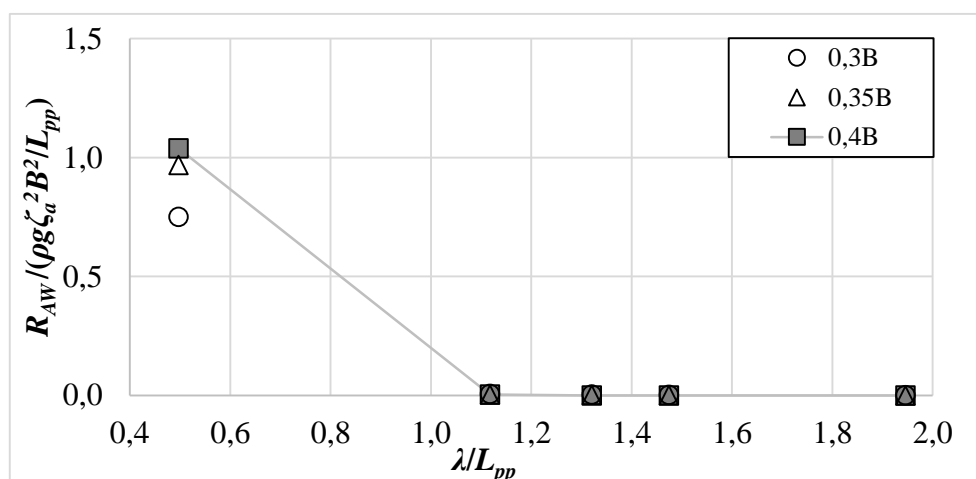
Slika 41. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$



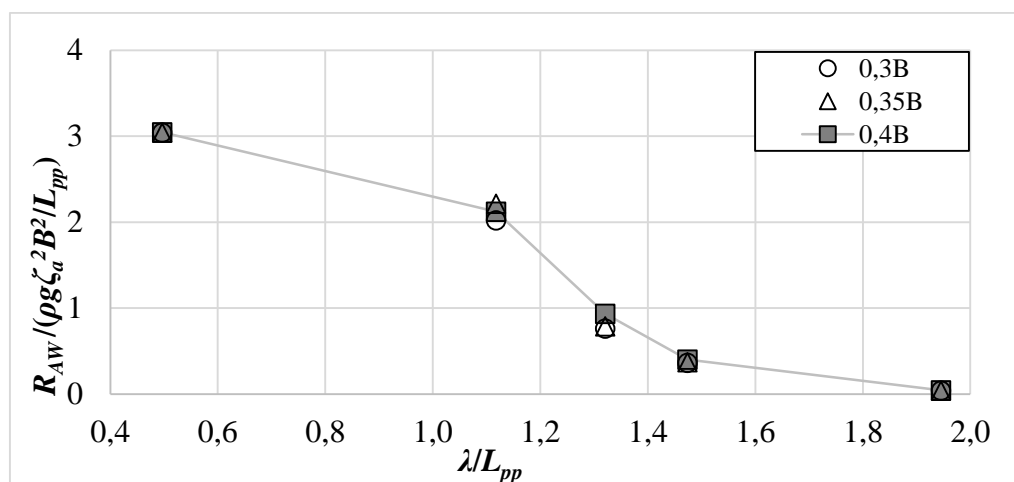
Slika 42. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,18$

5.4.1. Analiza utjecaja radijusa tromosti mase broda oko osi x na dodatni otpor broda na valovima za različite kutove nailaska valova

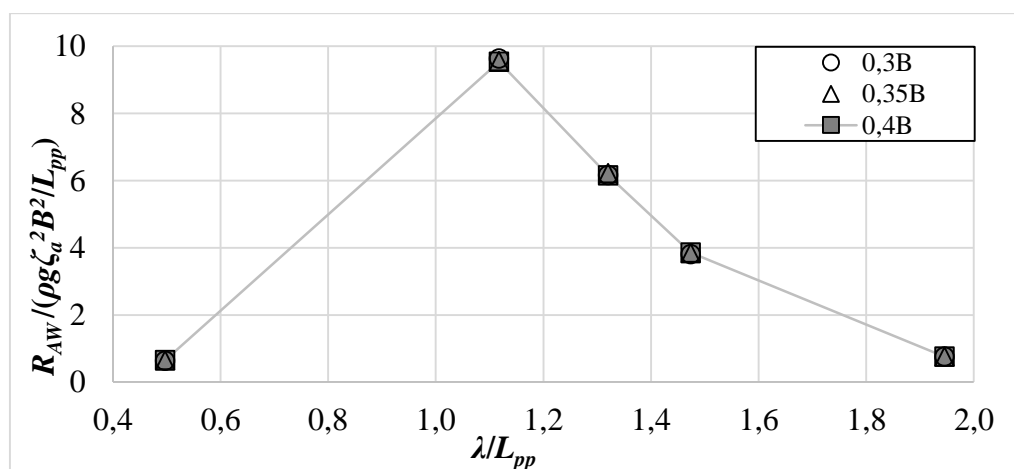
Kao i za slučaj valova u pramac, gdje je utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor zanemariv, kod različitih kutova nailaska valova rezultati se također neznatno razlikuju što je moguće vidjeti na slikama 43.-51. Kod bočnih valova, pri $\beta = 90^\circ$, moguće je uočiti utjecaj promjene radijusa tromosti mase oko osi x na kratkim valovima na dodatni otpor, odnosno odstupanje dobivene vrijednosti dodatnog otpora na valovima oko 28%. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x dolazi do izražaja i pri $\beta = 120^\circ$, gdje je odstupanje u području umjerenih valnih duljina do 18%. Kao što je i očekivano, za valove koso u pramac utjecaj radijusa tromosti oko osi x je zanemariv. Drugim riječima, kod valova koso u pramac i valova u pramac dominantna gibanja su poniranje i posrtanje, dok pri bočnim valovima treba uzeti u obzir i ljuljanje broda.



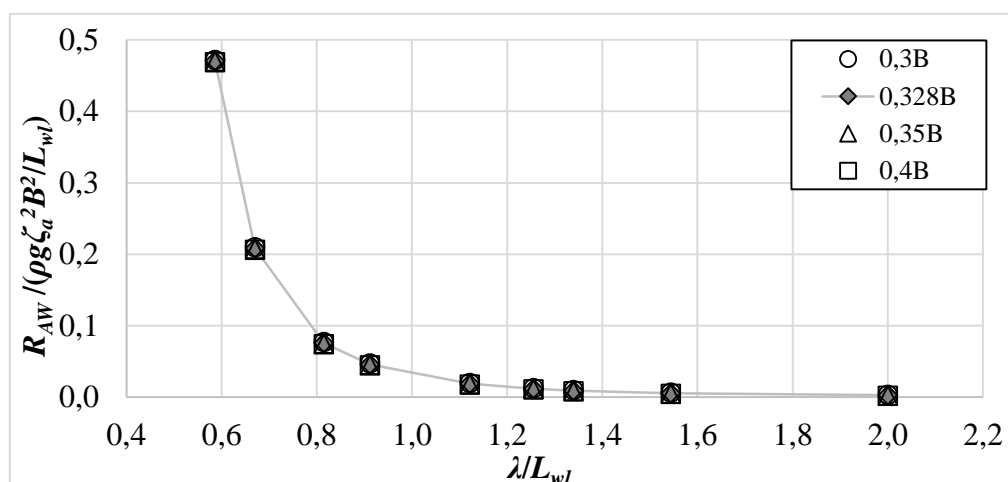
Slika 43. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



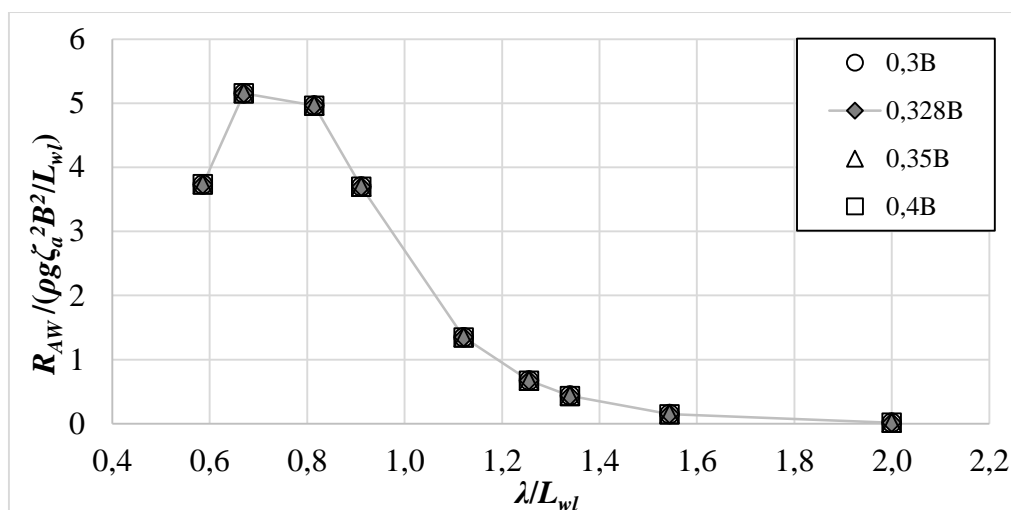
Slika 44. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



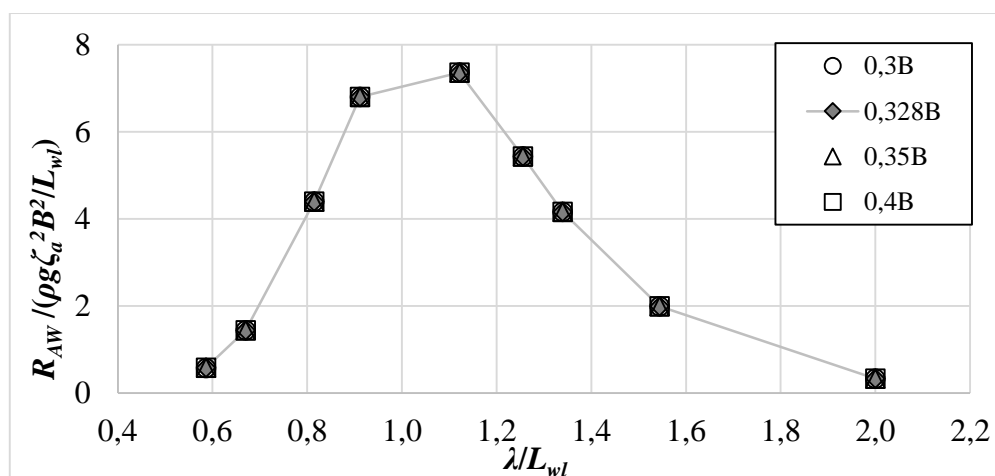
Slika 45. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



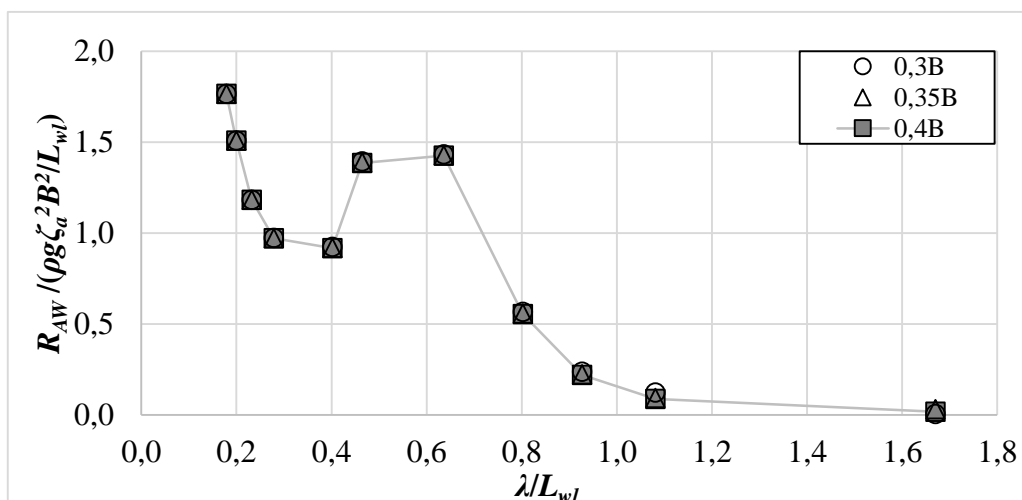
Slika 46. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



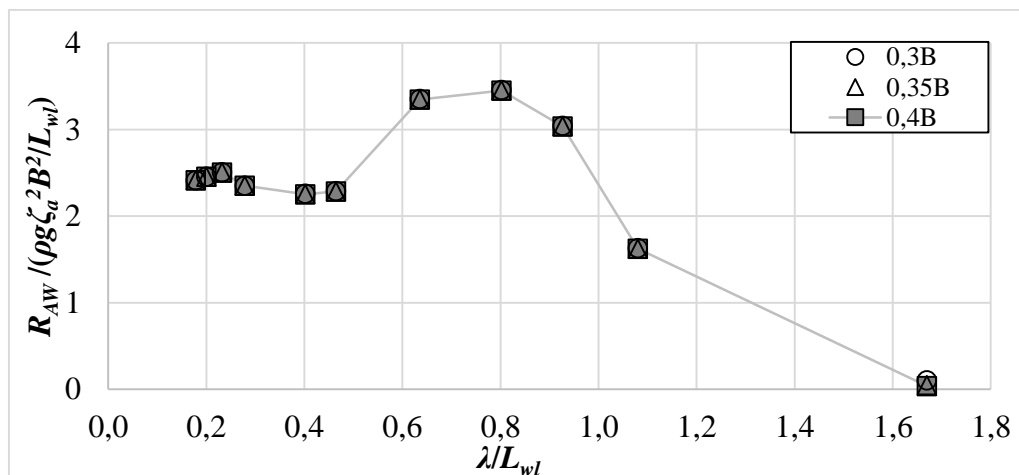
Slika 47. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



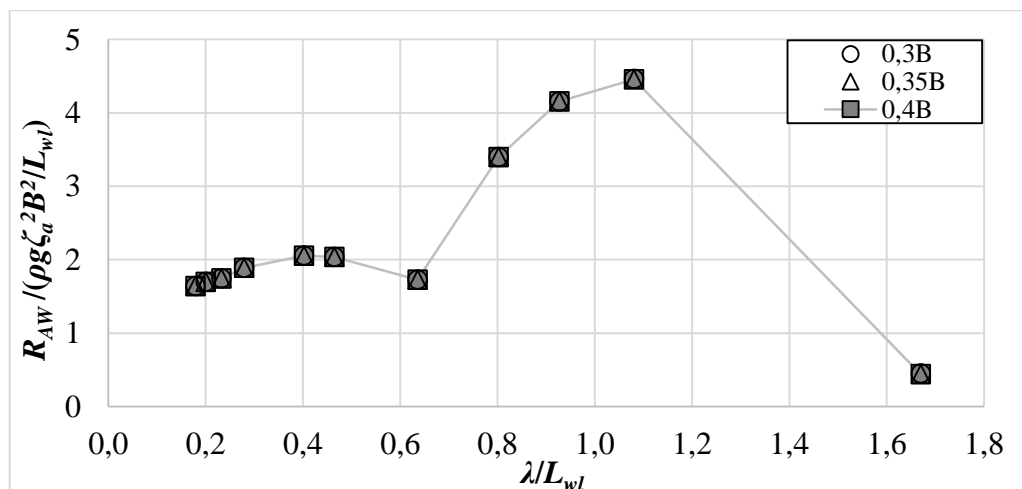
Slika 48. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



Slika 49. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$



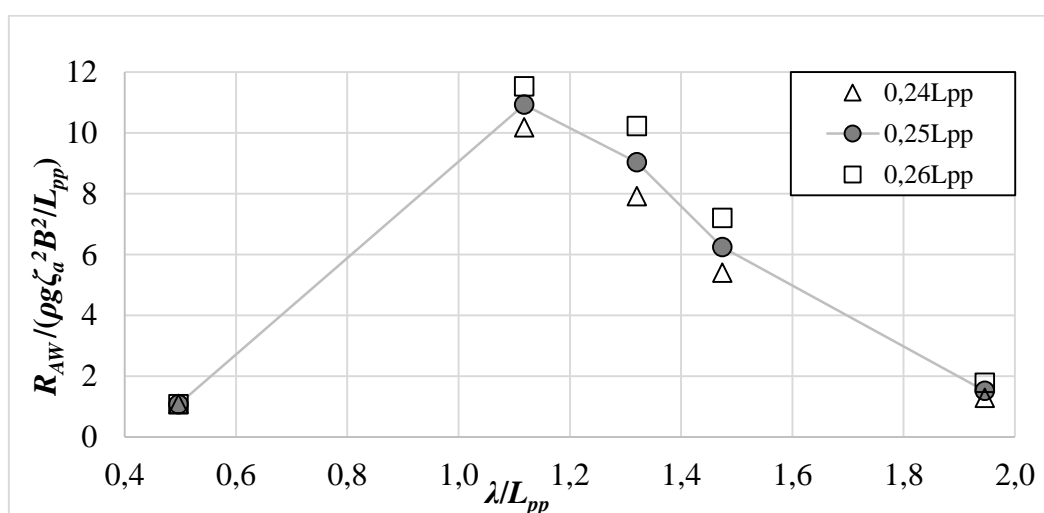
Slika 50. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$



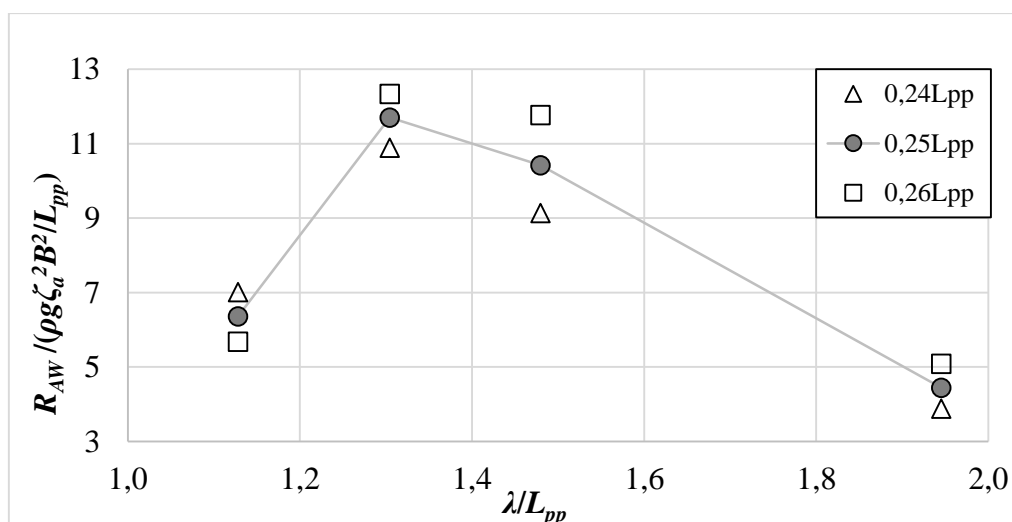
Slika 51. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$

5.5. Analiza utjecaja radijusa tromosti mase broda oko osi y i z na dodatni otpor broda na valovima u pramac

Radijus tromosti mase oko osi y odnosno z značajno utječe na dodatni otpor na valovima u pramac kao što se vidi na slikama 52.-57. To je bilo i očekivano, jer je duljina broda, na temelju koje je definiran radijus tromosti mase oko osi y odnosno z, veći utjecajni parametar u odnosu na širinu broda na temelju koje se definira radijus tromosti mase oko osi x. Kao što je spomenuto u poglavlju 4.3 odabrani raspon variranja vrijednosti radijusa tromosti mase oko osi y odnosno z je $24-26\%L_{pp}$. Ispitane su dvije brzine odnosno, dva Froudeova broja te se može zaključiti da dodatni otpor raste s porastom brzine.

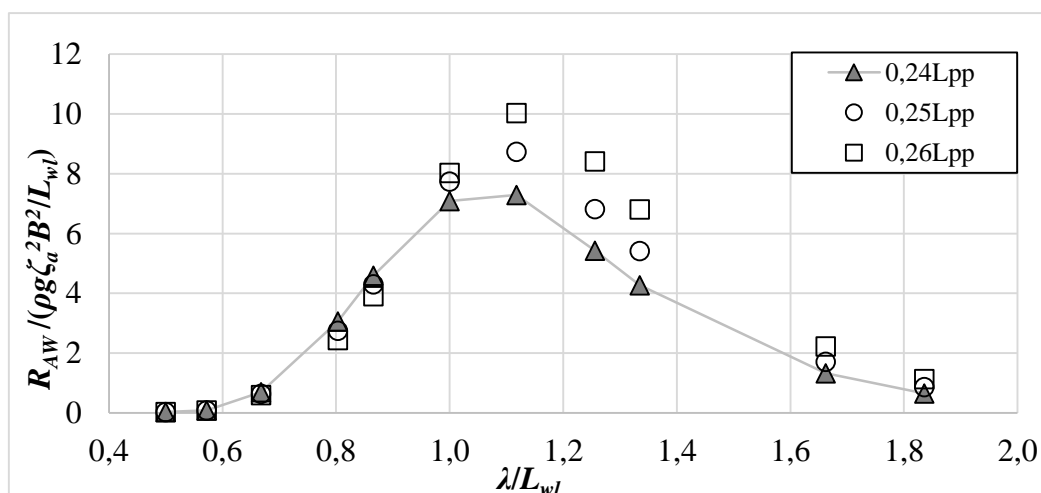


Slika 52. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,26$

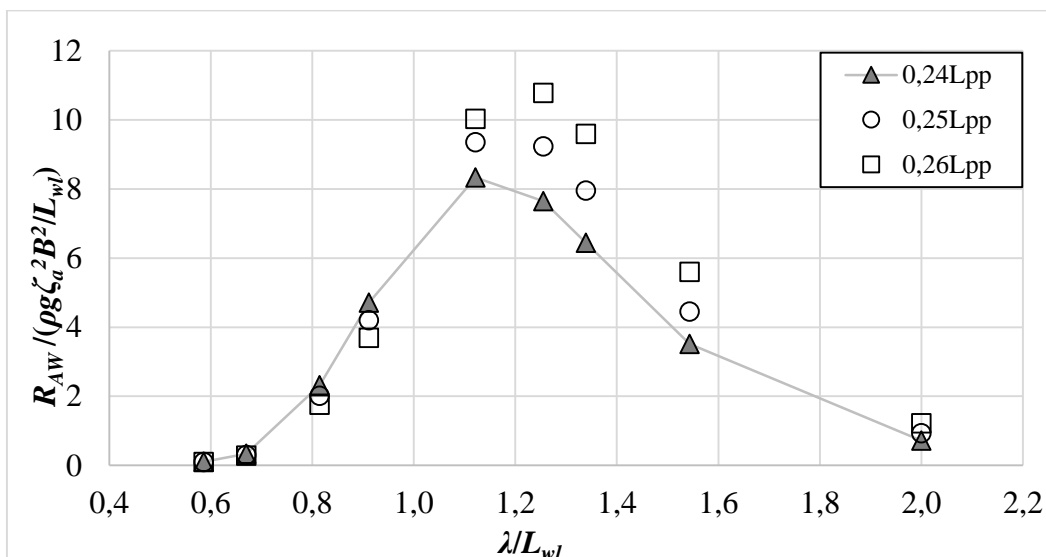


Slika 53. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za KCS pri $Fr = 0,40$

U slučaju kontejnerskog broda KCS, utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima uočljiv je u cijelom rasponu omjera λ / L_{pp} . Izuzevši područje kratkih valova, radijus tromosti mase veći od 25% L_{pp} rezultira većim vrijednostima dodatnog otpora, što je bilo i očekivano. Maksimalna relativna devijacija dodatnog otpora u području umjerenih frekvencija ($\lambda / L_{pp} \approx 1,1$) iznosi do 15% za slučaj oba Froudeova broja i obje varijacije radijusa tromosti mase, slike 52. i 53. Također, položaj maksimalnih vrijednosti dodatnog otpora s porastom brzine pomiče se prema nižim frekvencijama odnosno prema valovima veće duljine.



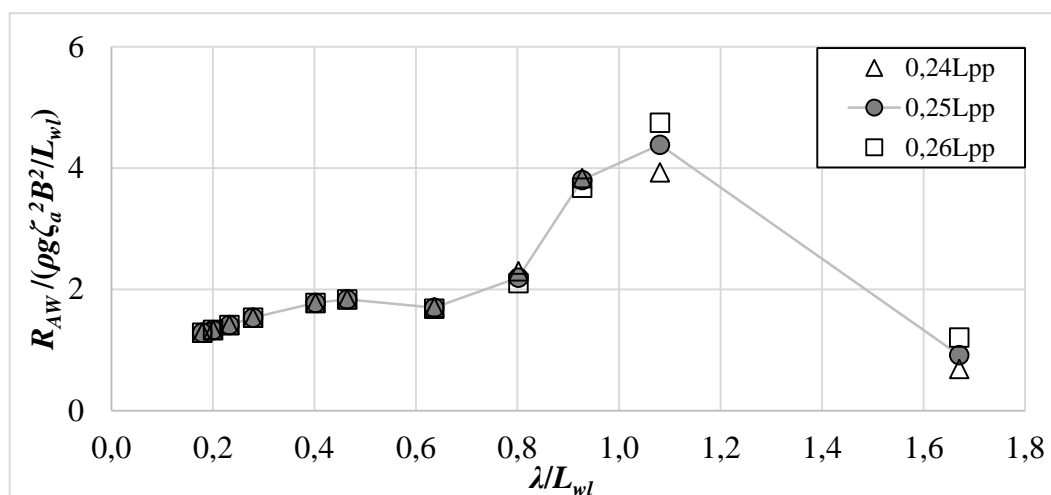
Slika 54. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,20$



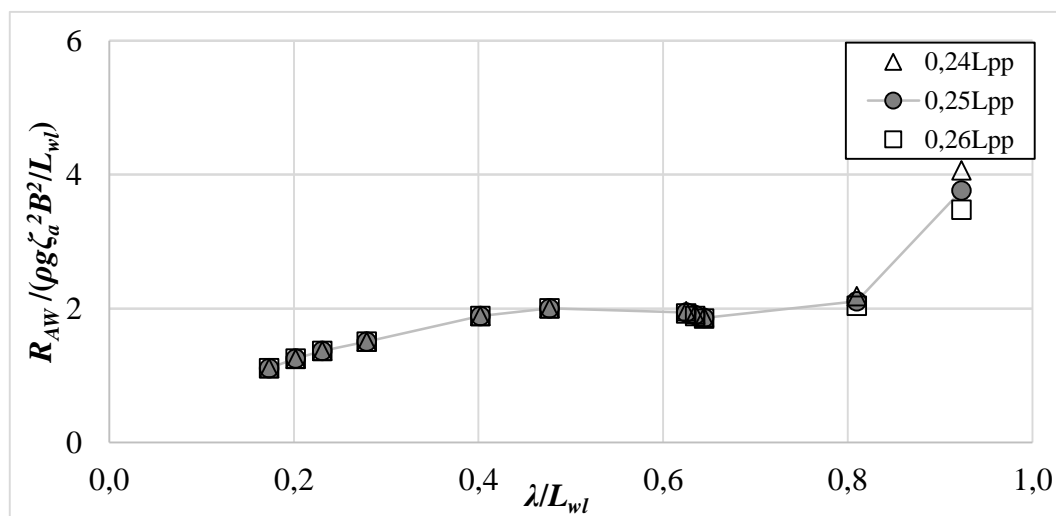
Slika 55. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za S175 pri $Fr = 0,25$

Vrlo sličan trend može se uočiti i za kontejnerski brod S175, gdje se vidi značajni utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor u području umjerenih frekvencija, slike 54. i 55. Maksimalna relativna devijacija u području umjerenih valnih duljina za slučaj radijusa tromosti mase $25\%L_{pp}$ iznosi oko 25%, a za slučaj $26\%L_{pp}$ iznosi oko 60% pri $Fr = 0,25$. Uzevši u obzir činjenicu da su najveće relativne devijacije u području niskih do umjerenih frekvencija, gdje se ujedno postižu i maksimalne vrijednosti dodatnog otpora, potrebno je biti oprezan pri odabiru ulaznih parametara proračuna kako bi rezultati bili što točniji. Također je moguće primijetiti da se kod nominalne brzine maksimalna vrijednost dodatnog otpora određena s radijusom tromosti mase $24\%L_{pp}$ nalazi na različitoj vrijednosti omjera valne duljine i duljine broda u odnosu na radijus tromosti mase $26\%L_{pp}$.

Za slučaj oba razmatrana kontejnerska broda vidljivo je kako na vrlo kratkim valovima vrijednost dodatnog otpora pada s povećanjem radijusa tromosti mase oko osi y . Obzirom da se povećanjem radijusa tromosti mase povećava i moment tromosti mase te se time smanjuju gibanja broda na valovima, vrijednost dodatnog otpora broda također pada. Međutim, na umjereno dugačkim valovima vrijednost dodatnog otpora povećanjem radijusa tromosti mase oko osi y također raste. Kako su povećanjem tromosti mase broda apsolutna gibanja broda manja, relativna gibanja broda u odnosu na gibanja valova se povećavaju što dovodi do povećanja dodatnog otpora na valovima. Na vrlo dugačkim valovima relativna gibanja broda teže k nuli što rezultira time da se brod giba zajedno s nailaznim valom, a dodatni otpor broda na valovima također teži k nuli.



Slika 56. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$

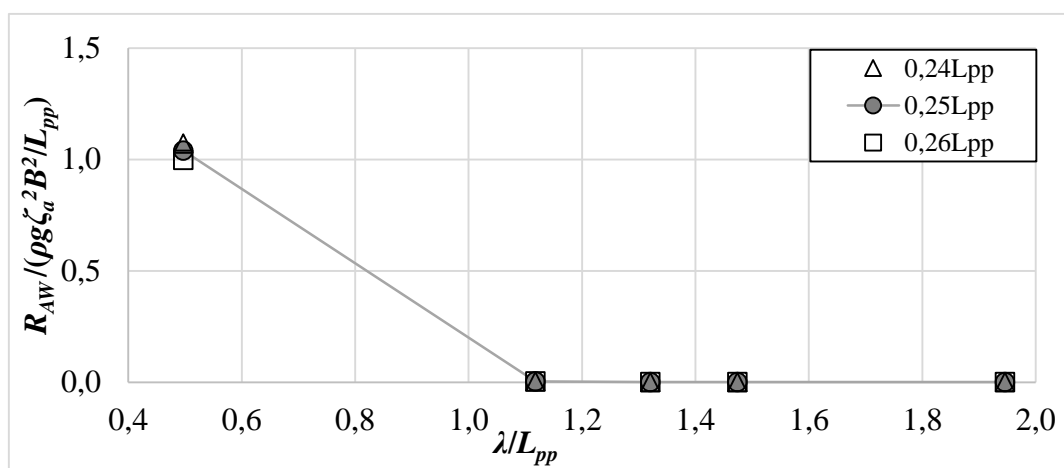


Slika 57. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima u pramac za KVLCC2 pri $Fr = 0,18$

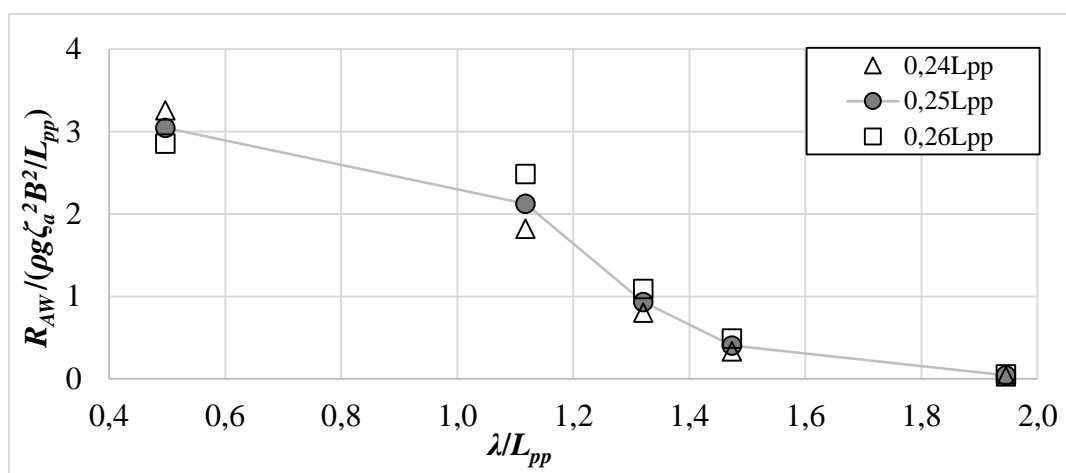
Relativne devijacije između rezultata dobivenih za KVLCC2 su neznajne osim u području umjerenih valnih frekvencija, gdje se ujedno postiže maksimalna vrijednost dodatnog otpora što je prikazano na slikama 56. i 57. Primjerice, maksimalna relativna devijacija dodatnog otpora pri $Fr = 0,142$ iznosi oko 10% za slučaj obje varijacije radijusa tromosti mase.

5.5.1. Analiza utjecaja radijusa tromosti mase broda oko osi y i z na dodatni otpor broda na valovima za različite kutove nailaska valova

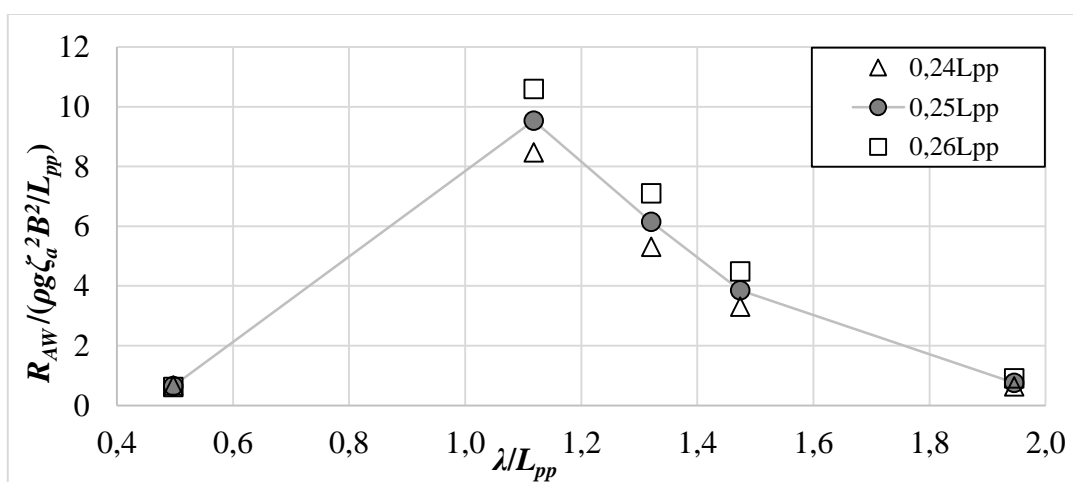
Na slikama 58.-66. prikazan je utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y odnosno z za različite kutove nailaska valova. Kod bočnih valova, pri $\beta = 90^\circ$, utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor je zanemarivo malen za sva tri razmatrana broda kao što se vidi na slikama 58., 61. i 64. S druge strane, pri $\beta = 120^\circ$ vidljivo je značajnije odstupanje rezultata uzrokovano variranjem radijusa tromosti oko osi y što je prikazano na slikama 59., 62. i 65. U slučaju kontejnerskog broda S175 pri $\beta = 120^\circ$ moguće je uočiti pomicanje maksimalne vrijednosti dodatnog otpora na valovima prema nižim frekvencijama, slika 62. Kod valova koso u pramac, $\beta = 150^\circ$, moguće je primijetiti sličan trend za sva tri razmatrana broda, slike 60., 63. i 66. Naime, u području vrlo kratkih valova utjecaj radijusa tromosti oko osi y je zanemariv, dok se u području umjerenih frekvencija primjećuje značajnije odstupanje između rezultata. U području kratkih valova vrijednosti dodatnog otpora izračunate s radijusom tromosti mase $24\% L_{pp}$ veće su od vrijednosti izračunatih s radijusom tromosti mase $26\% L_{pp}$ što se može vidjeti na slici 63.



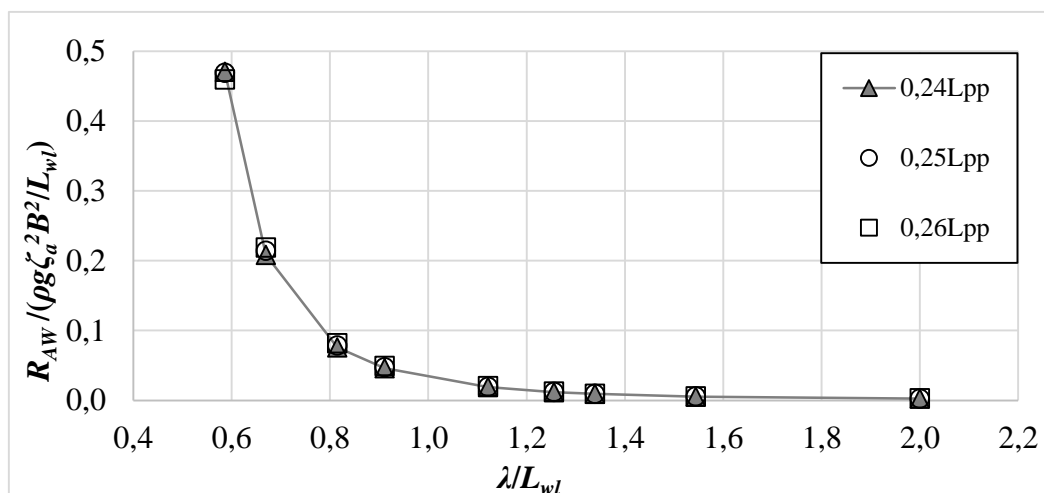
Slika 58. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



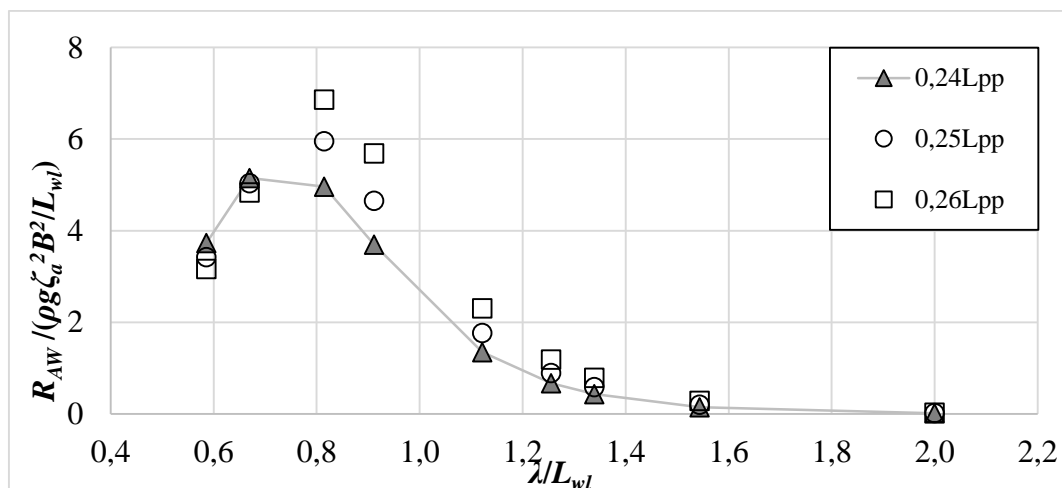
Slika 59. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



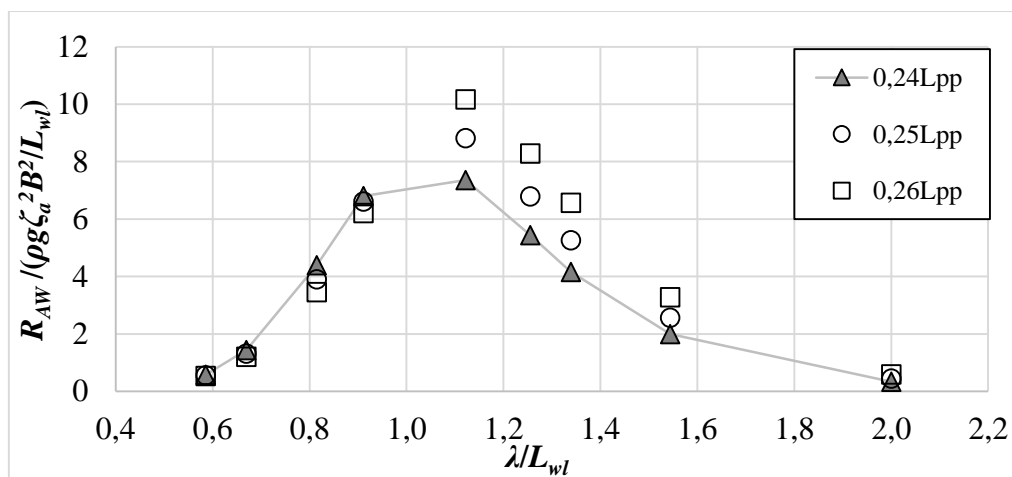
Slika 60. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KCS pri $Fr = 0,26$



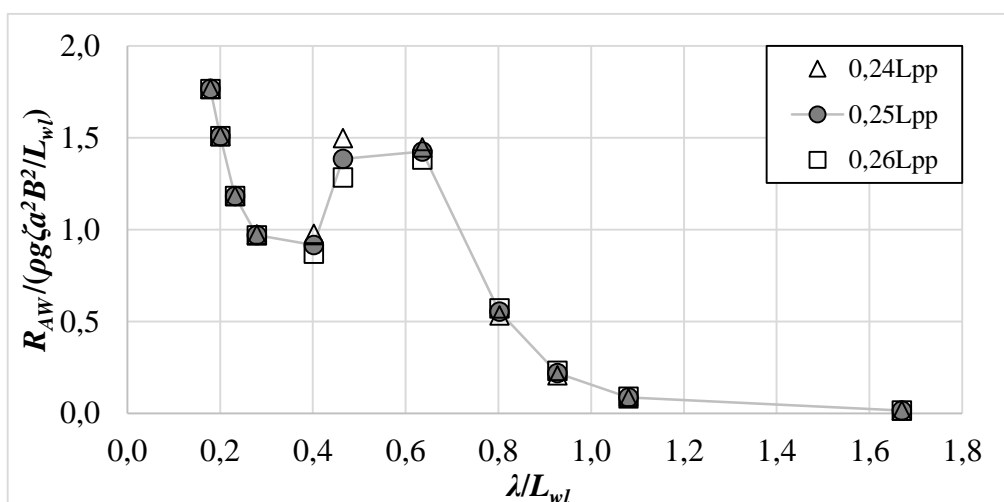
Slika 61. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



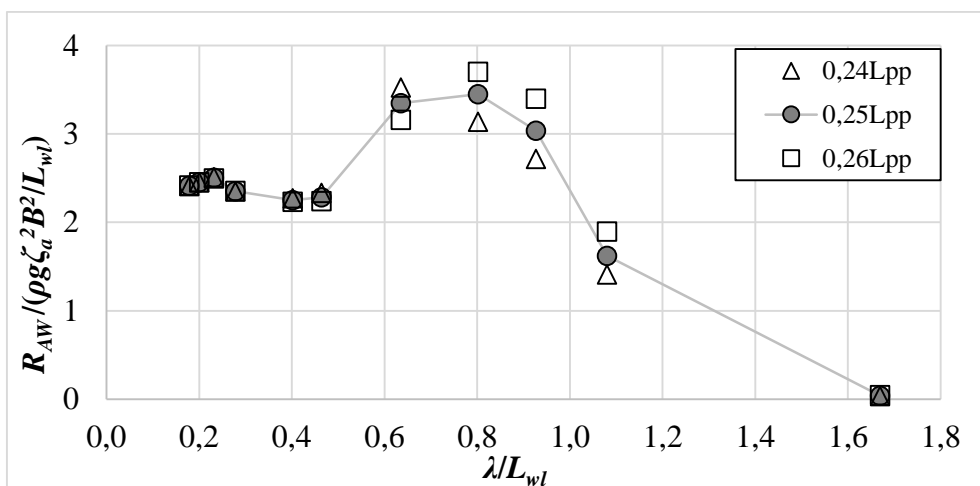
Slika 62. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



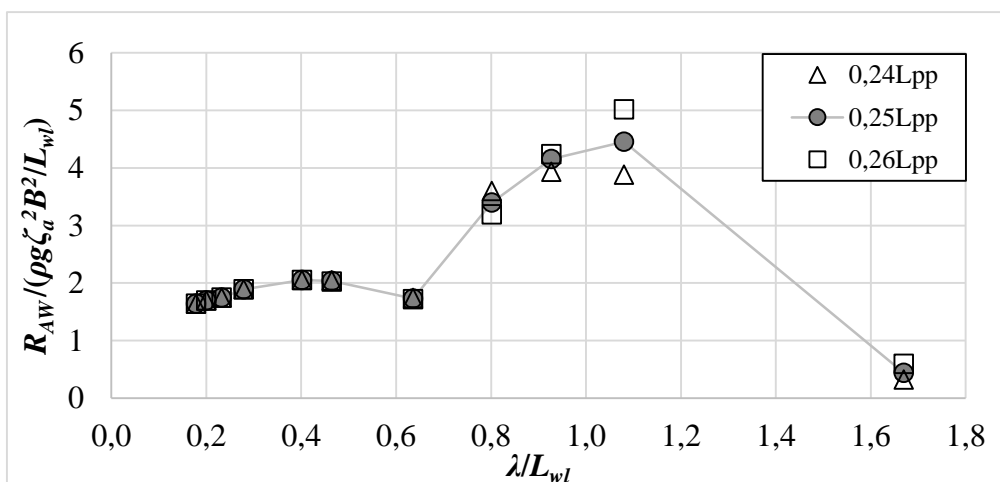
Slika 63. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za S175 pri $Fr = 0,25$



Slika 64. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=90^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$



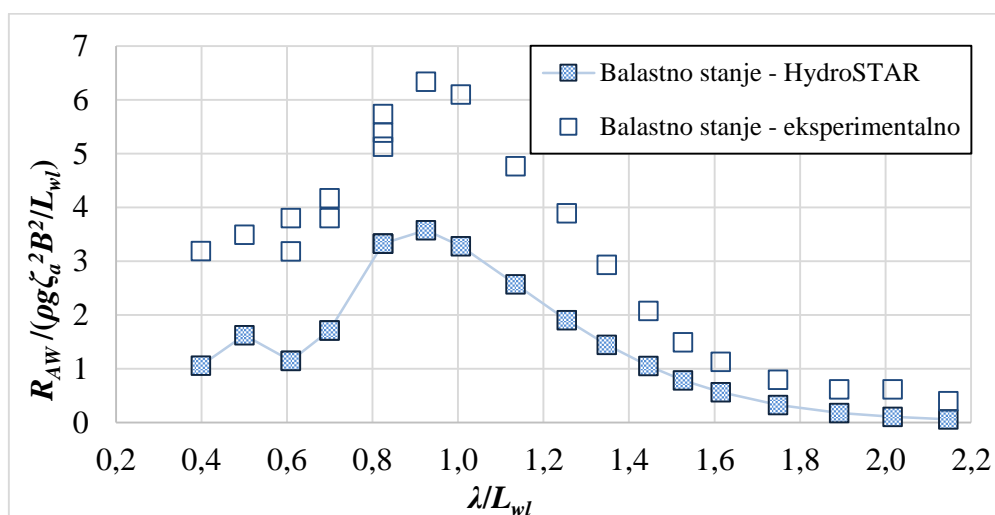
Slika 65. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=120^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$



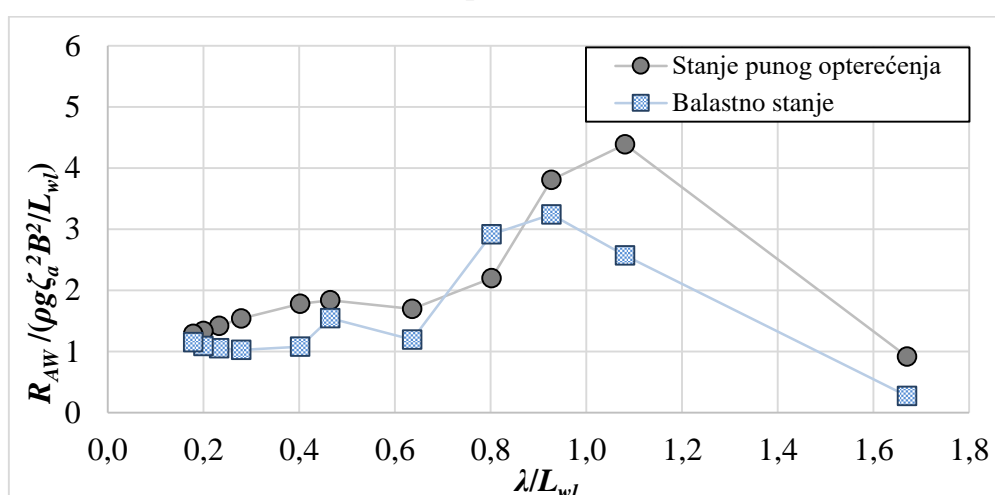
Slika 66. Utjecaj radijusa tromosti mase oko osi y na dodatni otpor na valovima kod $\beta=150^\circ$ za KVLCC2 pri $Fr = 0,142$

5.6. Analiza utjecaja dodatnog otpora broda na valovima za balastno stanje i usporedba sa stanjem punog opterećenja

Dodatni otpor na pravilnim valovima u pramac za KVLCC2 u balastnom stanju je uspoređen s dostupnim eksperimentalnim podacima što je prikazano na slici 67. Iako je trend rezultata dobro opisan, dobivene numeričke vrijednosti znatno podcjenjuju eksperimentalne podatke u cijelom promatranom rasponu λ/L_{wl} . Odstupanja između rezultata su bila očekivana u području kratkih valova zbog difrakcijskog utjecaja na dodatni otpor koji panelna metoda, temeljena na Greenovom integralnom teoremu, ne opisuje zadovoljavajućom točnošću. Također su i u području umjerenih valnih duljina vidljiva značajna odstupanja dobivenih rezultata od eksperimentalnih podataka s relativnom devijacijom oko -50%.

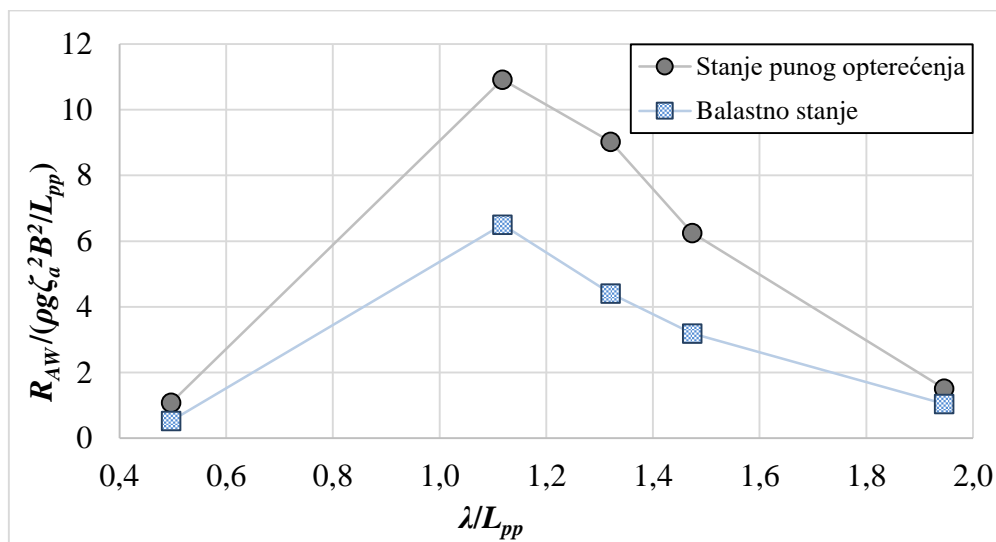


Slika 67. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za KVLCC2 u balastnom stanju pri $Fr = 0,142$



Slika 68. Usporedba rezultata za KVLCC2 u balastnom stanju i stanju punog opterećenja pri $Fr = 0,142$

Usporedba dobivenih numeričkih rezultata za KVLCC2 za stanje punog opterećenja i balastno stanje je prikazana na slici 68. U području kratkih valova vidljivo je očekivano povećanje dodatnog otpora za balastno stanje u odnosu na stanje punog opterećenja. S druge strane, u području umjerenih frekvencija bezdimenzijska vrijednost dodatnog otpora veća je za stanje punog opterećenja. Relativna devijacija rezultata za stanje punog opterećenja i rezultata za balastno stanje za $\lambda/L_{wl} \approx 1,1$ iznosi oko 40%.



Slika 69. Usporedba rezultata za KCS u balastnom stanju i stanju punog opterećenja pri $Fr = 0,26$

Trend numerički dobivenih rezultata za KCS u balastnom stanju i stanju punog opterećenja je isti te je maksimalna vrijednost dodatnog otpora u oba slučaja postignuta pri istoj valnoj duljini, slika 69.

Na temelju dobivenih rezultata dodatnog otpora broda na valovima u balastnom stanju, moguće je zaključiti kako panelna metoda nije u mogućnosti pravilno integrirati tlakove po varijabilnoj oplakanoj površini uslijed izraženijih relativnih gibanja broda u balastnom stanju te značajnije efektivne promjene forme trupa broda uslijed tih gibanja. S druge strane, potrebno je uzeti u obzir i mjernu nesigurnost prilikom provođenja eksperimenta dodatnog otpora broda na valovima u balastnom stanju. Naime, posebice na vrlo kratkim valovima kada se mjeri mala vrijednost sile drugog reda, mjerna nesigurnost te šum u izmjerenim rezultatima raste [12].

6. ZAKLJUČAK

Dodatni otpor broda na valovima značajna je komponenta ukupnog otpora broda, koja utječe na smanjenje brzine plovidbe kao i povećanje potrošnje goriva. Stoga je njegova pouzdana procjena od velike važnosti u preliminarnoj fazi projektiranja broda. Dodatni otpor broda na valovima sila je drugog reda koja nastaje uslijed interakcije valnog sustava broda i nailaznih valova. Određuje se na temelju sile zanošenja kao valnog opterećenja drugog reda uslijed nailaznih valova na trup broda, preko kvadratne prijenosne funkcije QTF.

U radu je proveden numerički proračun dodatnog otpora za tri različita broda na pravilnim valovima, panelnom metodom koja se temelji na Greenovom integralnom teoremu koristeći programski paket HydroSTAR. Dobiveni numerički rezultati dodatnog otpora na valovima uspoređeni su s dostupnim eksperimentalnim podacima. Dobro slaganje numeričkih i eksperimentalnih rezultata dobiveno je za slučaj kontejnerskog broda KCS, osim u području kratkih valova, gdje programski paket HydroSTAR nije u mogućnosti dobro opisati nelinearnosti koje se pojavljuju. S druge strane, numerički rezultati dodatnog otpora kontejnerskog broda S175 te tankera KVLCC2 pokazuju značajnije podcjenjivanje rezultata u usporedbi s eksperimentalnim podacima.

U radu su razmatrani i različiti kutovi nailaska valova na brod, gdje za slučaj valova koso u pramac krivulje dodatnog otpora imaju isti trend kao i kod valova u pramac, ali su dobivene vrijednosti dodatnog otpora, zbog utjecaja poprečne komponente sile zanošenja, manje. Kod bočnih valova, odnosno pri $\beta = 120^\circ$, moguće je uočiti utjecaj i poprečne i uzdužne komponente sile zanošenja u području kratkih valova. U području vrlo dugačkih valova relativna gibanja broda su mala pa dodatni otpor teži prema nuli, a prisutna je samo poprečna komponenta sile zanošenja F_y . Utjecaj komponente F_y postaje još izraženiji u slučaju bočnih valova, pri $\beta = 90^\circ$, gdje je uzdužna komponenta sile zanošenja F_x zanemariva u cijelom rasponu omjera λ / L_{pp} . Važno je spomenuti da se usporedbom dobivenih rezultata dodatnog otpora za različite kutove nailaska valova, maksimalna vrijednosti dodatnog otpora u području kratkih valova postiže pri $\beta = 120^\circ$ za sva tri razmatrana broda.

Prije same analize utjecaja promjene značajki mase broda na dodatni otpor na valovima, izračunate su približnim metodama vrijednosti položaja težišta mase broda po visini te radijusi tromosti mase. Dok je približno određivanje radijusa tromosti mase broda relativno jednostavno, određivanje položaja težišta mase broda po visini znatno je složenije. Naime, jedan od glavnih parametara za određivanje vrijednosti položaja težišta mase broda je period

ljuljanja broda. Iako je sam proces određivanja perioda ljuljanja dosta složen, pokazalo se kako je njegova vrijednost vrlo važan utjecajni parametar prilikom određivanja položaja težišta mase broda po visini.

Na temelju rezultata približnih metoda određivanja pojedinih značajki mase broda, odabran je raspon variranja istih kako bi se analizirao njihov utjecaj na dodatni otpor broda na valovima.

Utjecaj položaja težišta mase broda po visini na dodatni otpor za valove u pramac je gotovo zanemariv. Određeno odstupanje između dobivenih vrijednosti moguće je primijetiti za slučaj bočnih valova u području visokih i umjerenih valnih frekvencija.

Nadalje, utjecaj radijusa tromosti mase oko osi x na dodatni otpor broda na pravilnim valovima u pramac je zanemariv obzirom da kod valova u pramac ne dolazi do ljuljanja broda. Jedino u slučaju bočnih valova primijećen je mali utjecaj na rezultate dodatnog otpora. S druge strane, radijus tromosti mase oko osi y odnosno z , pokazuje značajan utjecaj na dodatni otpor na valovima za kontejnerske brodove KCS i S175, gdje su najveće relativne devijacije primijećene u području umjerenih valnih frekvencija. Naime, na vrlo kratkim valovima gdje su apsolutna gibanja broda mala, vrijednost dodatnog otpora pada s povećanjem radijusa tromosti mase oko osi y . Nasuprot tome, na umjereno dugačkim valovima vrijednost dodatnog otpora raste s povećanjem radijusa tromosti r_{yy} . Treba napomenuti da se položaj maksimalnih vrijednosti dodatnog otpora na valovima s porastom Froudeovog broja pomiče prema nižim frekvencijama odnosno prema valovima veće duljine.

U radu je također proračunat dodatni otpor broda na valovima u balastnom stanju te je uspoređen sa stanjem punog opterećenja. U području kratkih valova, zbog utjecaja difrakcijske komponente dodatnog otpora, ukupni dodatni otpor broda na valovima u balastnom stanju je veći. S druge strane, u području umjerenih valnih frekvencija bezdimenzijska vrijednost dodatnog otpora veća je za stanje punog opterećenja. Budući da se oplakana površina, po kojoj se integriraju tlakovi s ciljem određivanja sile dodatnog otpora na valovima, značajnije mijenja u balastnom stanju u odnosu na stanje punog opterećenja, panelna metoda nije u mogućnosti pravilno odrediti dodatni otpor u balastnom stanju posebice u području visokih valnih frekvencija.

Iz svega navedenog, moguće je zaključiti kako pojedine značajke mase broda značajno utječu na dodatni otpor na valovima. Kako bi se dobila što pouzdanija procjena dodatnog otpora broda na valovima potrebno je prvenstveno što točnije procijeniti radijus tromosti mase broda oko osi y odnosno z obzirom da je njihov utjecaj na rezultate dodatnog otpora najveći.

LITERATURA

- [1] Rebull, S.M.: Powering a Vessel in a Seaway, B. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2014.
- [2] Prpić-Oršić, J., Čorić, V.: Pomorstvenost plovnih objekata, Zigo, Rijeka, 2006.
- [3] Ohkusu, M.: Advances in Marine Hydrodynamics, Kyushu University, Japan, 1996.
- [4] Batchelor, G.: An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 1967.
- [5] Faltinsen, O.M.: Sea Loads on Ships and Offshore Structures, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.
- [6] HYDROSTAR for Experts, v6.11, 2010. Bureau Veritas, Paris.
- [7] Prpić-Oršić, J., Nabergoj, R., Trincas, G.: The methods of added resistance estimation for ships in a seaway, Proceedings of 18th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding SORTA, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Uljanik Brodogradilište d.d., Zagreb; Pula, 2008.
- [8] Lloyd, A.R.J.M.: Ship Behaviour in Rough Weather, A R J M Lloyd, Hampshire, UK, 1998.
- [9] Radan, D.: Uvod u hidrodinamiku broda, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2004.
- [10] Chen, X.B.: Hydrodynamics in Offshore and Naval Applications-Part I, Proceedings of the 6th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD '04), Australia, 2004.
- [11] Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P.: Numerical Recipes in C++, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 2002.
- [12] Seo, M.G., Yang, K.K., Park, D.M., Kim, Y.: Study on added resistance of a tanker in head waves at different drafts, Ocean Engineering, Vol. 111, 2016., pp. 569–581.
- [13] Barrass, C.B.: Ship Design and Performance for Masters and Mates, Elsevier Butterworth – Heinemann, UK, 2004.
- [14] Uršić, J.: Plovnost broda, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1991.
- [15] Van Laarhoven, B.J.H.: Stability Analysis of Parametric Roll Resonance, Eindhoven University of Technology Department Mechanical Engineering Dynamics and Control Group Eindhoven, June 2009.
- [16] Papanikolaou, A.: Ship Design, Methodologies of Preliminary Design, School of Naval Architecture and Marine, National Technical University of Athens, Greece, 2014.
- [17] Gugić, D., Slapničar, V.: Osnivanje broda, interna predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.

- [18] Bertram V., Schneekluth H.: Ship Design for Efficiency and Economy, Butterworth-Heinemann, UK, 1998.
- [19] Comstock, J.: Principles of Naval Architecture, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1967. pp. 827.
- [20] Gerr, D.: Basic Criteria for Powerboat Stability, The Masthead, Vol. 1, Issue 4, 2007., pp. 9.
- [21] Smith, L. D.: Marine design, Universities of Glasgow and Strathclyde, 2005.
- [22] Parsons, G. M., Lamb, T.: Ship Design and Construction, Parametric Design, Ch. 11, New York, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003.
- [23] Michalski, P. J.: A parametric method for preliminary determining of mass characteristics of inland navigation ships, Gdansk University of Technology, 2005.
- [24] http://www.serdarbeji.com/wp-content/uploads/2014/08/SHIP-THEORY_DYNAMICS_2.pdf, Beji, S.: Ship Theory – Dynamics, Seakeeping And Maneuvering, 2014.
- [25] Marine Systems Government, Industry Workshop of the Society of Allied Weight Engineers: Weight Distribution and Moments of Inertia for Marine Vehicles, 2009.
- [26] Malenica, Š.: Second order internal loads in monochromatic waves, BV Internal Report, NT 2665/DTA/SM, Pariz.
- [27] <http://ocw.mit.edu>, Design of Ocean Systems MIT Course, Lecture 11: Drift and Slowly-Varying Loads, MIT OpenCourseWare.
- [28] Chen, X. B., Rezende, F.: Computations of low-frequency wave loading, Proceedings of the 23rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 23rd IWWFBB, Korea, 2008.
- [29] St. Denis, M., Pierson W.J.: On the Motions of Ships in Confused Seas, 1953.
- [30] Chen, X. B., Malenica, Š.: Hydrodynamic pressure distribution on ship hull at very high encounter frequencies. Journal of Hydrodynamics, Vol. 22, Issue 5 SUPPL. 1, 2010., pp. 515-520.
- [31] Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Joncquez, S., Stern, F.: EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves, Journal of Marine Science and Technology, 2013., 18(4), pp.435-459.
- [32] Duan, W., Li, C.: Estimation of Added resistance for Large Blunt Ship in Waves, Journal of Marine Science and Application 12, 2013, pp.1-12.
- [33] Luo, W., Guo C., Wu T., Dai S., Su Y.: Numerical simulation of viscous flow field around ships in ballast, Journal of Coastal Research, 32(4), 2016., pp.911–922.

-
- [34] Park, D. M., Kim, Y., Seo, M.G., Lee J.: Study on added resistance of a tanker in head waves at different drafts, *Ocean Engineering*, 111, 2016., pp. 569-581.